

**ESTUDO TÉORICO E EXPERIMENTAL DAS  
PRESSÕES EM TREMONHAS CÔNICAS E  
PIRAMIDAIIS DE SILOS METÁLICOS  
ESBELTOS**

**LUCIANO HENRIQUE DE SOUZA VIEIRA**

**2009**

**LUCIANO HENRIQUE DE SOUZA VIEIRA**

**ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DAS  
PRESSÕES EM TREMONHAS CÔNICAS E  
PIRAMIDAIS PARA SILOS METÁLICOS ESBELTOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções e Ambiência, para obtenção do título de "Mestre".

Orientador

Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes

LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2009

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca Central da UFLA**

Vieira, Luciano Henrique de Souza.

Estudo teórico e experimental das pressões em tremonhas  
cônicas e piramidais de silos metálicos esbeltos / Luciano Henrique  
de Souza Vieira. – Lavras : UFLA, 2009.

110 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2009.

Orientador: Francisco Carlos Gomes.

Bibliografia.

1. AS 3774:1996. 2. EN 1991-4:2006. 3. Silo. 4. Pressão  
estática. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 681.7631



Ao meu avô Garcia Moreno dos Santos Vieira (*in memoriam*),

Por ser sempre minha fonte de inspiração;

### **OFEREÇO**

A minha avó Cleide Maria dos Santos Vieira, por me incentivar nessa  
empreitada;

A minha madrinha Cleide Maria Vieira, pela dedicação total e irrestrita;

### **DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade de realização do trabalho;

A EESC/USP/LaMEM pela oportunidade de estágio;

Ao Professor Carlito Calil Junior da EESC/USP/LaMEM pelas considerações e orientações;

A todo o pessoal que trabalha na EESC/USP/LaMEM pela ajuda e amizade;

Ao Professor Tomás de Aquino do Laboratório de Protótipos do DEG/UFLA pela ajuda crucial na realização dos ensaios;

Aos meus grandes amigos Diogo Tubertini Maciel, Vinícius Murata Saito e Ewerton Felipe do Prado Machado, sem vocês não teria conseguido!

Ao Professor Francisco Carlos Gomes pela orientação, apoio e muita amizade na graduação e mestrado.

Ao Senhor Roberto do Laboratório de Protótipos do DEG/UFLA pela ajuda nos ensaios;

Aos meus amigos do setor de Construções e Ambiência Hellen, Adriana, Raphaela e Humberto pela amizade e companheirismo;

Ao meu pai João Luciano dos Santos Vieira pelos ensinamentos;

Aos meus tios Francisco, Marcelo e Fernando por todos esses anos de dedicação e amizade;

As minhas irmãs Nayara, Mayra e Luciana e primos, Marcelinho, Juninho, Vinícius e Larissa pela amizade;

Por fim, a todos aqueles que fazem parte da minha vida e contribuem para que eu me torne uma pessoa cada dia melhor!

## SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	i
LISTA DE SÍMBOLOS .....	ii
RESUMO .....	ix
ABSTRACT .....	x
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO .....	3
2.1 Estudo de silos .....	3
2.1.1 Importância econômica .....	3
2.1.2 Caracterização e classificação dos silos .....	5
2.1.3 Classificação das tremonhas .....	7
2.2 Propriedades físicas dos produtos armazenados .....	10
2.2.1 Importância .....	10
2.2.2 Tensões do produto no silo .....	13
2.2.3 Fatores que influenciam as propriedades físicas .....	14
2.2.4 Ensaio de cisalhamento na TSG 70-140 .....	15
2.2.5 Determinação das principais propriedades do produto .....	16
2.2.5.1 Ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno .....	16
2.2.5.2 Ângulo de atrito cinemático (dinâmico) com a parede .....	20
2.2.5.3 Determinação dos valores característicos superior e inferior .....	24
2.3 Fluxo .....	25
2.3.1 Vantagens e desvantagens do tipo de fluxo .....	32
2.3.2 Obstruções de fluxo .....	33
2.3.3 Função fluxo .....	34
2.3.4 Fator fluxo da tremonha .....	35
2.3.5 Obstrução em “tubo” .....	36
2.3.5.6 Obstrução em “arco” .....	37
2.3.5.7 Determinação da dimensão mínima da boca de descarga .....	38
2.3.5.7.1 Dimensão mínima da boca de descarga para fluxo de massa .....	38
2.3.5.7.2 Dimensão mínima da boca de descarga para fluxo de funil .....	40
2.3.5.8 Determinação da inclinação das paredes da tremonha .....	41
2.4 Pressões em paredes de tremonhas .....	42
2.4.1 Pressões em paredes de tremonha pelo método de Baikov .....	42
2.4.2 Pressões em paredes de tremonha pelo método de Walker .....	45
2.4.2.1 Pressões estáticas na tremonha .....	47
2.4.2.2 Pressões de descarga (dinâmicas) na tremonha .....	48
2.4.3 Pressões em paredes de tremonha - AS 3774-1996 .....	49
2.4.4 Pressões em paredes de tremonha - EN 1991-4:2006 .....	52
2.4.4.1 Primeiro método de cálculo das pressões em tremonhas - EN 1991-4:2006 .....	52
2.4.4.2 Segundo método de cálculo das pressões em tremonhas - EN 1991-4:2006 .....	54
2.4.5 Pressões em paredes de tremonhas excêntricas .....	55
2.4.5.1 Pressões em tremonhas excêntricas - AS 3774-1996 .....	56
2.4.5.2 Pressões em tremonhas excêntricas – Guaita et al. (2003) .....	58
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	63

3.1 Produto granular .....	63
3.2 Modelos físicos propostos .....	64
3.3 Construção das tremonhas .....	66
3.4 Plataforma para atuação das cargas .....	68
3.5 Atuador de cargas .....	69
3.6 Aquisição de dados .....	70
3.7 Medida da deformação nas paredes da chapa .....	71
3.8 Métodos de ensaio .....	72
3.9 Ensaio especial .....	75
3.10 Transformação das deformações em pressões .....	76
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
4.1 Resultados dos ensaios na tremonha piramidal .....	81
4.2 Resultados dos ensaios na tremonha cônica .....	91
5 CONCLUSÕES .....	105
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	106

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ACI	American Concrete Institute
AS	Australian Standard
CBFC	Canadian Farm Building Code
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CZC	Chapa zincada
DEG	Departamento de Engenharia
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	European Committee of Standardization
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MEF	Método dos Elementos Finitos
OSB	Oriented Strand Board
RC	Relógio Comparador
SSTT	Standard Shear Testing Technique for Particulate Solids Using the Jenike Shear Cell
TGD	Teoria dos Grandes Deslocamentos
UFLA	Universidade Federal de Lavras

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras romanas minúsculas

$a_w$	Fator de contato na parede
$b$	coeficiente empírico
$b_c$	Orifício de saída para tremonha axissimétrica
$b_f$	Dimensão mínima da boca de descarga para fluxo de funil
$b_{min}$	Dimensão mínima da boca de descarga
$b_p$	Orifício de saída para tremonha plana
$c$	Coesão entre partículas
$c_c$	Coefficiente de fluxo geométrico
$c_{nf}$	Multiplicador de pressão normal na parede
$d$	Diâmetro do silo
$d_c$	Diâmetro do silo
$d_e$	Distância próxima à saída do eixo de excentricidade
$d_z$	Função relativa à altura efetiva da superfície e a característica de Janssen
$e_i$	Excentricidade de carregamento do silo
$e_o$	Excentricidade da tremonha
$f(h)$	Função-objetivo
$ff$	Fator Fluxo da tremonha

$h$	Altura do silo
$h_b$	Altura total efetiva da massa de grãos armazenados
$h_{ch}$	Altura do cone
$h_D$	Altura da transição no lado de maior excentricidade
$h_h$	Altura vertical da tremonha
$l_h$	Comprimento da parede da tremonha
$p_{ef, max}$	Pressão efetiva máxima no lado de maior excentricidade
$p_{ef, red}$	Pressão efetiva de redução no lado de menor excentricidade
$p_h$	Pressão horizontal
$p_{HT}$	Pressão horizontal na tremonha
$p_n$	Pressão normal na tremonha
$p_{n1}$	Pressão na tremonha devido a pressão vertical causada pelo armazenamento do produto no silo na região de transição
$p_{n2}$	Pressão na tremonha devido a pressão vertical causada pelo armazenamento do produto no silo na saída da tremonha
$p_{n3}$	Pressão na tremonha devido ao peso do produto na mesma
$p_{nf}$	Pressão normal na parede durante o fluxo
$p_{nhi}$	Pressão normal inicial (estática) na parede da tremonha
$p_{ni}$	Pressão inicial normal na parede
$p_{NT}$	Pressão normal na superfície média das paredes da tremonha
$p_s$	elevação de pressão na transição
$p_t$	Pressão de atrito na tremonha

$p_{TT}$	Pressão tangencial na superfície média das paredes da tremonha
$p_v$	Pressão vertical
$p_{vf}$	Pressão vertical
$p_{vft}$	Pressão vertical na região de transição
$p_{vit}$	Pressão vertical média quando $z=h_0+h_c$
$p_{VT}$	Pressão vertical na transição
$p_{V,tr}$	Pressão vertical dinâmica na transição
$\overline{p}_{VT}$	Pressão vertical média na tremonha
$q$	Pressão de atrito
$r_c$	Dimensão característica
$t$	Espessura da parede (chapa)
$u_2$	Fator de contato na parede trapezoidal
$u_3$	Fator de contato na parede ondulada
$x$	Coordenada vertical da pressão na tremonha
$\overline{x}$	Propriedade média
$z$	Altura equivalente
$z'$	Distância a partir do vértice da tremonha
$z_h$	Altura vertical da tremonha

#### **Letras romanas maiúsculas**

$C_b$	Fator para majoração das ações no fundo do silo
-------	---

$D$	Diâmetro ou lado do silo
$D1$	Superfície da parede do silo polida
$D2$	Superfície da parede do silo lisa
$D3$	Superfície da parede do silo rugosa
$E$	Módulo de elasticidade
$F$	Tensão de cisalhamento
$F_f$	Valor característico da relação de pressão na tremonha
$FF$	Função Fluxo
$G(\phi_i)$	Fator de tubo
$H$	Altura do silo
$H(\alpha)$	Função dependente da forma geométrica e da inclinação da tremonha
$I$	Momento de inércia
$K$	Relação entre as pressões horizontais e verticais
$K_h$	Relação entre as pressões horizontais e verticais
$K_l$	Valor característico inferior da relação de pressão lateral
$K_m$	Relação entre as pressões horizontais e verticais
$L$	Comprimento mínimo da abertura da boca da tremonha
$M$	Momento fletor
$N$	Tensão normal
$P$	Tensão de cisalhamento
$P_{pre}$	Tensão de pré-cisalhamento

$R$	Raio hidráulico
$S$	Coefficiente devido ao formato da tremonha
$YL$	Lugar geométrico de deslizamento
$Z$	Profundidade

### **Letras gregas minúsculas**

$\alpha$	Inclinação da tremonha com a vertical
$\alpha_1$	Ângulo da parede de união da tremonha
$\alpha_2$	Ângulo da parede de união da tremonha
$\varepsilon$	Deformação específica
$\gamma$	Peso específico do produto
$\gamma_h$	Valor característico superior do peso específico
$\gamma_i$	Valor inferior da densidade do produto
$\phi_e$	Efetivo ângulo de atrito interno
$\phi_{e,s}$	Valor superior do efetivo ângulo de atrito interno
$\phi_i$	Ângulo estático de atrito interno
$\phi_{im}$	Valor médio do ângulo de atrito interno
$\phi_r$	Ângulo de repouso
$\phi_w$	Ângulo de atrito entre o produto e a parede do silo
$\phi_{w,c}$	Ângulo de atrito da parede

$\phi_{ws}$	Valor superior do ângulo de atrito entre o produto e a parede do silo
$\sigma$	Tensão normal
$\sigma_I$	Maior tensão principal de consolidação
$\sigma_I'$	Tensão atuante em um arco estável imaginário
$\overline{\sigma}_1$	Tensão atuante nos apoios de um arco formado pelo produto
$\sigma_c$	Tensão confinada de ruptura
$\sigma_{crit}$	Tensão crítica
$\sigma_f$	Tensão de flexão
$\sigma_{ic}$	Tensão inconfinada
$\sigma_p$	Tensão normal principal
$\sigma_w$	Tensão normal de cisalhamento entre o produto e a parede do silo
$\sigma_x$	Tensão normal na direção x
$\sigma_y$	Tensão normal na direção y
$\sigma_{y,o}$	Tensão normal na direção y
$\sigma_z$	Tensão normal na direção z
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$\tau_{pre}$	Tensão de pré-cisalhamento
$\tau_w$	Tensão de cisalhamento entre o produto e a parede do silo
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\mu$	Coefficiente de atrito entre produto e parede
$\mu_h$	Valor característico inferior do coeficiente de atrito entre produto e

parede da tremonha

$\mu_{hef}$  Efetivo coeficiente de atrito na parede

$\mu_{heff}$  Valor característico do coeficiente de atrito entre o produto e a parede da tremonha

$\mu_i$  Coeficiente de atrito interno

$\mu_w$  Coeficiente de atrito entre produto e parede

$\mu_{w,c}$  Coeficiente de atrito da parede do corpo do silo

$\beta$  Ângulo de inclinação da tremonha com a vertical

$\beta_e$  Ângulo circunferencial

$\delta$  Coeficiente de variação

$\psi$  Ângulo de dilatação

#### **Letras gregas maiúsculas**

$\Phi$  Ângulo de atrito interno

## RESUMO

VIEIRA, Luciano Henrique de Souza. **Estudo teórico e experimental das pressões em tremonhas cônicas e piramidais de silos metálicos esbeltos.** 2009. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.\*

A tremonha se destaca como uma região de incertezas com relação ao fluxo de produto e às pressões atuantes. Seu comportamento durante o carregamento e a descarga dos produtos é pouco conhecido. Devido à excentricidade na sua boca de descarga, as incertezas aumentam, gerando projetos antieconômicos ou inseguros. Sendo assim, realizou-se um estudo teórico baseado nas normas AS 3774:1996 (australiana) e EN 1991-4:2006 (européia). Os resultados obtidos pelos cálculos foram comparados a um estudo experimental através de dois modelos de tremonhas em escala reduzida, sendo uma tremonha metálica piramidal, com 33% de excentricidade e outra metálica cônica, com 55% de excentricidade. Para os ensaios, utilizou-se areia como produto granular e cargas foram aplicadas através de uma prensa hidráulica, simulando diferentes relações altura/diâmetro. A partir dos resultados encontrados, concluiu-se que ambas as normas apresentaram métodos de cálculos satisfatórios para a determinação das pressões em tremonhas piramidais. A aplicação do método 2 da EN 1991-4:2006 forneceu valores de pressões superiores aos encontrados em ensaio, conduzindo a um dimensionamento mais conservador da estrutura. A norma EN 1991-4:2006 oferece melhores resultados quanto à tremonha cônica. Porém, a AS 3774:1996 também pode ser utilizada para a determinação das pressões em tremonhas cônicas excêntricas.

Palavras-chave: AS 3774:1996; EN 1991-4:2006; silo; pressão estática.

---

\* Orientador: Francisco Carlos Gomes - UFLA.

## ABSTRACT

VIEIRA, Luciano Henrique de Souza. **A theoretical and experimental study on pressures in conical and pyramidal hoppers of slender metallic silos.** 2009. 110 p. Dissertation (Msc in Agricultural Engineer) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.\*

The hopper structure is still an area of great uncertainties regarding the product flow and the acting pressures. Its behavior during loading and downloading products is little known. With the eccentricity of the discharge hopper, the uncertainties only increase, resulting, at times, in insecure or anti economic projects. This study design was based on the AS 3774:1996 (Australian) and on the EN 1991-4:2006 (European) norms. The results obtained were compared to an experimental study that tests two hopper models in reduced scale, being one a metallic pyramidal hopper, with 33% of eccentricity; the other, conic, with 55% of eccentricity. For the tests, sand was used as a granular product and pressures charges were applied by using a hydraulic press, simulating different height/diameter ratios. From the research findings, it was concluded that both norms presented satisfactory calculation methods to determine the pressures in pyramidal hoppers. The application of the method 2 of EN 1991-4:2006 provided pressures values superior to the ones found during the tests, leading to a more conservative dimensioning of its structure. The norm EN 1991-4:2006 offers better results for the conic hopper. However, the AS 3774:1996 can also be used to determine the pressures in eccentric conic hoppers.

Key words: AS 3774:1996; EN 1991-4:2006; silo; static pressure.

---

\* Adviser: Francisco Carlos Gomes, PhD – UFLA.

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores exportadores de grãos e carnes do mundo, gerando um crescente aumento de produção e produtividade do agronegócio brasileiro. Sendo assim, a preocupação com a armazenagem de produtos como soja, trigo, milho, farelos e tantos outros deve ser redobrada. Porém, a armazenagem desses produtos é feita em silos que apresentam características estruturais muitas vezes desconhecidas pelos técnicos de campo levando a freqüentes ruínas dessas unidades. Um estudo detalhado do comportamento dos silos pode levar a resultados que minimizem os acidentes, aumentando os níveis de segurança e melhorando as técnicas estruturais empregadas atualmente.

Dessa forma, fazem-se necessários estudos que visem a conhecer o comportamento das estruturas do silo, dado os esforços demandados quando de seu carregamento, descarga e aumentos de pressões devido a acomodações dos produtos no interior das unidades.

Uma unidade tecnicamente projetada e bem conduzida pode levar a vantagens tais como: minimização das perdas de produto devido à quebra técnica, minimização de ataques de insetos, fungos e ratos, economia de transporte uma vez que os preços dos fretes aumentam em períodos de safra, diminuição do custo de transporte pela eliminação de impurezas e excesso de umidade dos grãos, maior regulagem de oferta e demanda de produtos no mercado ao longo do ano e menores flutuações de preços devido à regulagem de demanda/oferta.

Dentre os constituintes do silo, a tremonha deve receber especial atenção por parte dos pesquisadores e projetistas uma vez que se trata de uma região fundamental para a caracterização do tipo de fluxo que o silo irá apresentar além de ser uma região abaixo da transição, ou seja, é um local onde as pressões possuem comportamentos bastante variáveis. As tremonhas podem apresentar

ainda uma excentricidade, ou seja, um deslocamento na boca de saída, tornando ainda mais complexa a caracterização das pressões atuantes.

A importância do estudo de tremonhas cônicas e piramidais, concêntricas ou excêntricas advém do fato de a maioria das normas internacionais para projetos de silos tratarem apenas dos dois casos, entendendo que qualquer outro modelo de tremonha é uma derivação destes.

O estudo das pressões em tremonhas excêntricas faz-se necessário uma vez que poucos trabalhos abordaram esse tema mundialmente e, no Brasil, ainda não existe uma norma para projetos de silos.

Com este propósito, realizou-se um estudo teórico baseado em duas normas, a australiana (AS 3774:1996) e a européia (EN 1991-4:2006). Após este estudo, os valores de pressões gerados por estas normas foram comparados a um estudo experimental utilizando dois modelos reduzidos de tremonhas, sendo um modelo piramidal com 33% de excentricidade e um modelo cônico com 55% de excentricidade.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Estudo de silos**

Historicamente, os primeiros silos verticais para armazenamento surgem com as novas técnicas de concreto armado unidas à revolução industrial do século XIX que criaram grandes núcleos industriais e elevaram o valor dos terrenos, tornando imprescindível a criação de técnicas que pudessem diminuir o espaço necessário ao armazenamento de diversos produtos (Calil Junior, 1984).

Ainda segundo Calil Junior (1984), no final do século XIX, em zonas de grande consumo e regiões portuárias, foram erguidos enormes silos de concreto armado com alta capacidade para armazenamento de cereais e em pouco espaço. Então, ao surgir tais estruturas, dão-se início as tentativas no intuito de solucionar os problemas de pressões e esforços nas paredes e elementos de suporte dos silos.

#### **2.1.1 Importância econômica**

Devido ao fato de o Brasil possuir uma economia com características agrárias, fato este evidenciado pela quantidade de produtos primários que são produzidos e exportados, o armazenamento e beneficiamento de produtos agrícolas tornam-se atividades de grande importância para o custo de produção destes produtos devendo ser dada a devida atenção a tais processos.

O armazenamento de produtos em silos é considerado uma solução de grande viabilidade devido à economia de espaço físico, mão-de-obra e custo de transporte, assim como a possibilidade de conservação do produto ensilado.

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2009), a capacidade de armazenagem na safra 2008/2009 foi superior a produção (Figura

1), porém, apenas uma parcela muito pequena desta produção é armazenada como mostrado na Tabela 1.

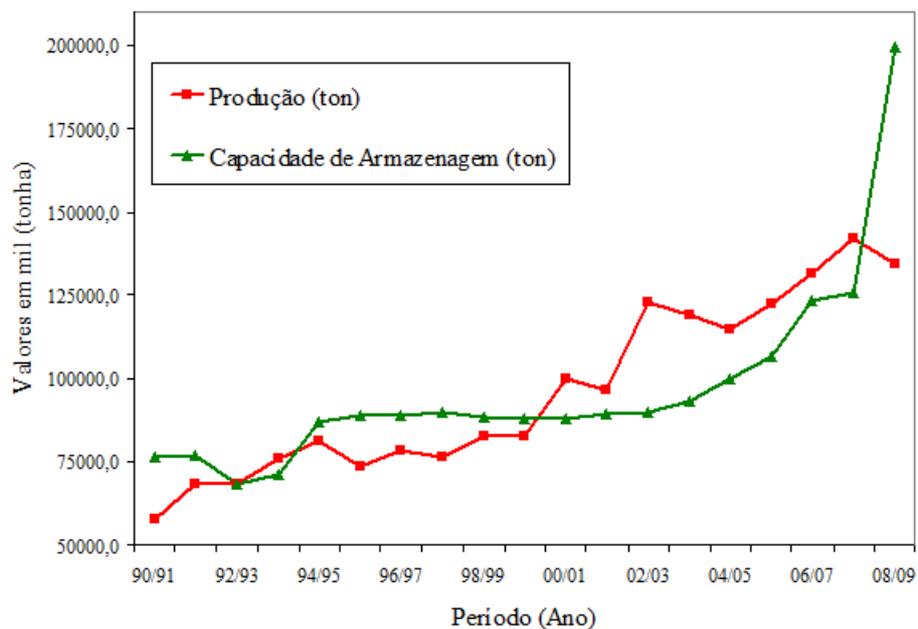


FIGURA 1 Evolução da produção e capacidade de armazenagem no Brasil.

Fonte: (Conab, 2009).

TABELA 1 Capacidade de armazenagem e quantidade armazenada segundo (Conab, 2009).

UF	Capacidade de Armazenagem	Quantidade Armazenada
Centro-oeste	43.954.562	3.907
Nordeste	7.240.400	1.156
Norte	2.462.504	453
Sudeste	20.522.481	2.783
Sul	125.509.188	16.529
<b>Total</b>	<b>199.689.135</b>	<b>24.828</b>

\* Dados da Conab, emissão em 05/11/08.

\*\* Valores em mil toneladas.

### 2.1.2 Caracterização e classificação dos silos

Atualmente podemos caracterizar silos como estruturas destinadas a armazenar algum tipo de produto que podem ser grãos, sementes, materiais pulverulentos, rações para animais entre outras finalidades.

Para uma maior definição do que vem a ser um silo, a Figura 2 apresenta seus constituintes e as principais pressões atuantes na estrutura.

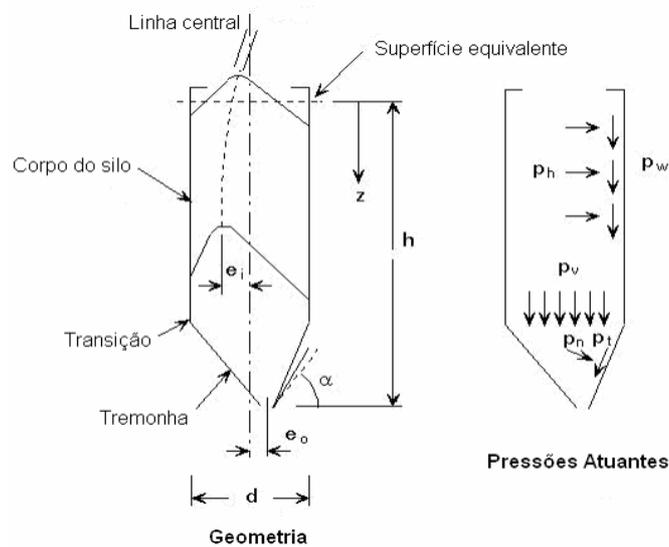


FIGURA 2 Principais constituintes de um silo e pressões atuantes.

Fonte: (Palma, 2005).

Os silos possuem diversas classificações com base nas suas dimensões, sua construção em relação ao solo e com relação a entrada ou não de ar dentro dos mesmos. Entre as quais podemos citar:

#### Classificação quanto a relação altura-diâmetro:

- Silos baixos (relação altura/diâmetro ou lado menor que 1);

- Silos esbeltos (normalmente são aqueles cuja relação altura/diâmetro ou lado é maior que 2);

- Silos horizontais (possuem o comprimento longitudinal maior que as outras dimensões).

Classificação quanto a construção em relação ao solo:

- Silos elevados (são construídos acima do solo e sustentados por pilares);

- Silos não elevados (possuem sua base ou fundo em contato com o solo).

A Tabela 2 apresenta a classificação dos silos quanto à esbeltez segundo as principais normas internacionais utilizadas para projetos de silos.

TABELA 2 Classificação de silos quanto à esbeltez pelas principais normas internacionais.

Norma	Classificação		
	Baixos	Medianamente esbeltos	Esbeltos
<u>Australina</u> AS3774:1996	$H/D < 1,0$	$1,0 \leq H/D \leq 3,0$	$H/D > 3,0$
<u>Européias</u> EN 1991-4:2006 DIN 1055-03:2005	$0,4 \leq H/D \leq 1,0$	$1,0 \leq H/D \leq 2,0$	$H/D \geq 2,0$
<u>Americanas</u> ACI-313:1991 ANS/ASAE EP433:2001	$H/D < 2,0$	-	$H/D > 2,0$
<u>Canadense</u> CFBC:1983	$H/D \leq 1,0$ ou $H/D < \tan^2(\phi_e / 2 + \pi / 4)$	-	$H/D > 1,0$ e $H/D \geq \tan^2(\phi_e / 2 + \pi / 4)$

Fonte: Calil Junior & Cheung (2007). Sendo: H – Altura do silo com a tremonha, D – Diâmetro do corpo do silo,  $\phi_e$  - Efetivo ângulo de atrito interno.

Classificação quanto a entrada de ar:

- Silos herméticos (não possuem contato com o ar atmosférico);
- Silos não-herméticos (possuem contato com o ar atmosférico).

**2.1.3 Classificação das tremonhas**

As tremonhas são estruturas com o objetivo de facilitar o fluxo de produtos armazenados em silos. Nesse sentido, desempenham um papel muito importante uma vez que sua geometria irá determinar o tipo de fluxo que ocorrerá durante o esvaziamento do silo.

Existem atualmente vários tipos de tremonhas no mercado podendo ser escolhidas para atender determinadas características do projeto. Quanto ao fluxo, podem ser divididas em tremonha de fluxo plano e tremonha de fluxo axissimétrico. Também podem ser classificadas quanto a sua forma geométrica em tremonhas de fundo plano, tremonhas com saída excêntrica e tremonhas com saída concêntrica.

A Figura 3 ilustra as formas mais comumente encontradas no mercado.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

FIGURA 3 (a) Cônica; (b) Saída quadrada; (c) Transição; (d) Bisel; (e) Piramidal; (f) Cunha.

Segundo Palma (2005), para um determinado produto, o ângulo de inclinação ( $\alpha$ ) para uma tremonha cônica será normalmente menor que o ângulo de uma em cunha. Jenike (1964) ressalta que as tremonhas em cunha (fluxo plano) permitem inclinações um pouco maiores (geralmente de  $8^\circ$  a  $10^\circ$ ) para produtos com as mesmas propriedades. Portanto, a tremonha em cunha necessita de menor altura quando comparada com a tremonha cônica. Além disso, a dimensão da boca de saída  $b_c$  para a tremonha cônica é normalmente maior que a largura  $b_p$  para a tremonha em cunha (Figura 4).

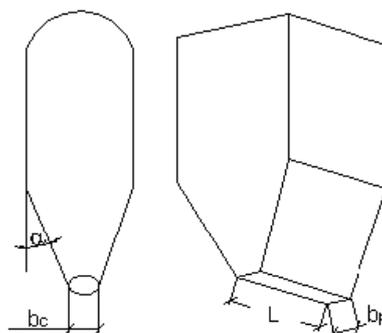


FIGURA 4 Dimensões da boca de saída  $b_c$  e  $b_p$ .

Fonte: (Palma, 2005).

A desvantagem da tremonha em cunha é que a abertura de descarga tem comprimento igual à largura do silo, sendo assim, torna-se necessário a utilização de transportadores mecânicos instalados na boca da tremonha para a retirada do produto. O comprimento mínimo da abertura é  $L = 3 b_p$ , que, na prática, é muito menor que a largura do silo. Por essa razão, a tremonha em transição vem sendo utilizada.

Para se obter fluxo constante de todo produto no esvaziamento do silo com a tremonha piramidal as arestas da mesma devem ser arredondadas

internamente para que o produto supere o atrito com a parede nos dois lados que suportam a formação de zonas estagnadas. A forma em bisel é simples e eficaz, mas tem a desvantagem do produto formar vazios dentro da tremonha, impedindo o fluxo. O mesmo ocorre para a forma piramidal com saída quadrada (Schulze, 1998).

No caso de silos que apresentam uma região estagnada de produto próximo às paredes, o ângulo de inclinação da tremonha com a vertical é maior se comparado a um fluxo de esvaziamento uniforme. Portanto, a tremonha neste tipo de fluxo tem menor altura e pode ser usada em locais onde a altura do silo é limitada. Contudo, dispositivos promotores de fluxo como vibradores podem ser necessários para evitar obstruções de fluxo (Palma, 2005).

## **2.2 Propriedades físicas dos produtos armazenados**

### **2.2.1 Importância**

Segundo Calil Junior et al. (1997), para o entendimento e dimensionamento das pressões que ocorrem em silos é de fundamental importância a determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados uma vez que este é o primeiro passo para o projeto de fluxo e das estruturas de silos. É importante ressaltar que a utilização das propriedades físicas devem ser realizadas para as condições mais severas das que são esperadas de ocorrer em um silo. Os parâmetros mais importantes a serem avaliados são:

- Peso específico ( $\gamma$ );
- Granulometria;
- Ângulo de repouso do produto ( $\phi_r$ );
- Ângulo estático de atrito interno ( $\phi_i$ );
- Efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ );

- Ângulo cinemático (dinâmico) de atrito entre o produto e a parede do silo ( $\phi_w$ );
- Função Fluxo (FF);
- Fator fluxo da tremonha ( $ff$ ).

Das propriedades listadas acima, a função fluxo e o fator fluxo da tremonha estão ligados à forma como o produto irá se comportar dentro do silo, podendo portanto, ser consideradas como propriedades físicas dos produtos uma vez que a determinação do seu valor é muito importante para caracterizar a escoabilidade ou fluidez do produto quando o silo está sendo descarregado.

As normas internacionais apresentam tabelas com os valores das propriedades físicas para alguns produtos e também métodos e equipamentos para sua determinação caso o produto a ser armazenado não conste na norma (Tabela 3).

TABELA 3 Valores característicos das propriedades físicas dos produtos armazenados.

Tipo de produto	Efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ), em graus (°)		Ângulo de atrito com a parede ( $\phi_w$ ), em graus (°)						Peso específico ( $\gamma$ ), KN/m <sup>3</sup>	
	Inferior	Superior	Tipo D1*		Tipo D2*		Tipo D3*		Médio	Superior
			Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior		
Farinha de trigo	23	30	15	23	25	28	25	35	6,5	7,5
Milho	28	33	15	25	20	30	25	32	7	8,5
Areia (Grossa, seca)	30	40	15	25	22	28	25	35	14	17
Soja	25	32	10	15	12	18	14	20	7	8
Trigo	26	32	15	25	18	30	25	32	7,5	9

\* Os valores descritos para o Tipo D1 diz respeito a uma parede de silo polida, Tipo D2 é lisa e Tipo D3 é rugosa.

Fonte: (Australian Standard – AS, 1996).

Mundialmente, o equipamento mais utilizado para a determinação das propriedades físicas é o aparelho de cisalhamento de translação conhecido internacionalmente como “*Jenike Shear Cell*” TSG 70-140 e o teste padrão de ensaio “*Standard Shear Testing Technique for Particulate Solids Using the Jenike Shear Cell*” (European Federation of Chemical Engineering – EFCE, 1989) proposto pela Federação Européia de Engenheiros Químicos (Figura 5 e 6).



FIGURA 5 Foto da *Jenike Shear Cell* em ensaio de cisalhamento.

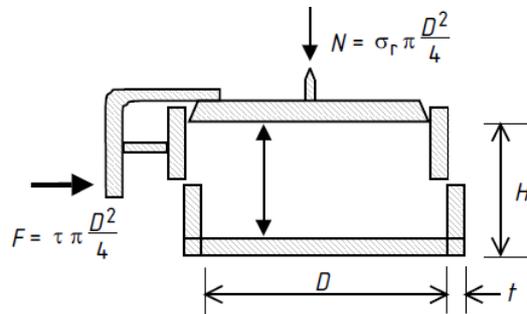


FIGURA 6 Desenho esquemático da Jenike Shear Cell. Fonte: (British Standard Institution - BSI, 2006). Sendo:  $F$  = força de cisalhamento;  $\tau$  = tensão cisalhante;  $N$  = carga de cisalhamento;  $\sigma_r$  = ângulo de repouso;  $D$  = diâmetro da célula;  $t$  = espessura da parede da célula e  $H$  = altura do célula.

Calil Junior & Cheung (2007) ressaltam que as amostras a serem usadas para os testes devem representar os extremos relevantes para as propriedades do produto tanto para o fluxo quanto para a pressão no silo. Portanto, as amostras devem estabelecer para cada produto armazenado:

- Umidades máxima e mínima;
- Dimensões médias das maiores e menores partículas, caso estas variem com o tempo;
- Uma amostra consolidada para o tempo máximo de armazenagem e uma instantânea, caso existam variações em função do tempo;
- Condições extremas que venham a afetar a coesão e as propriedades físicas do material a armazenar.

### 2.2.2 Tensões do produto no silo

Uma característica importante que distingue os produtos armazenados (sólidos) e os fluidos deve-se ao fato de os sólidos serem capazes de transmitir

tensões de atrito entre os grãos e as paredes do silo e da tremonha diferentemente dos fluidos que estão sujeitos apenas a tensões hidrostáticas (Figura 7).

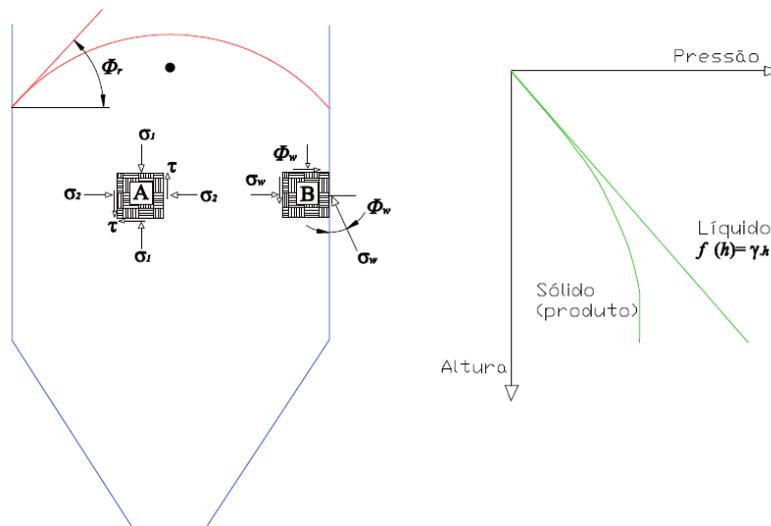


FIGURA 7 Estado de tensões em dois pontos do produto. Fonte: Calil Junior e Cheung (2007). Sendo:  $\Phi_r$  = ângulo de repouso do produto;  $\tau$  = tensão de cisalhamento;  $\sigma_1$  = tensão de atrito vertical;  $\sigma_2$  = tensão de atrito horizontal;  $\sigma_w$  = tensão de atrito entre produto e parede do silo e  $\Phi_w$  = ângulo de atrito entre produto e parede do silo.

Sendo assim, os produtos armazenados apresentam diversas características que influenciam no seu estado de tensões dentro do silo (Calil Junior & Cheung, 2007).

### 2.2.3 Fatores que influenciam as propriedades físicas

Diversos fatores podem influenciar as propriedades dos produtos armazenados sendo que, os principais abordados mundialmente são (Calil Junior, 2007):

- Peso específico;
- Compactação;
- Compressibilidade;
- Tamanho das partículas;
- Ângulo de repouso;
- Degradação;
- Corrosão;
- Abrasão.

#### **2.2.4 Ensaio de cisalhamento na TSG 70-140**

Em resumo, o teste de cisalhamento constitui-se de duas fases sendo que, na primeira fase a amostra é cisalhada na tensão de pré-cisalhamento (*pré-shear*) para a obtenção de um fluxo estável e definição do lugar geométrico de deslizamento (*Yield Locus*). Na segunda fase, é aplicada uma tensão de cisalhamento (*shear*) para a determinação real das tensões de cisalhamento. Os valores da tensão de cisalhamento serão sempre menores que os valores de pré-cisalhamento e determinarão as tensões cisalhantes necessárias para o deslizamento (ruptura) do produto (Palma, 2005).

No Brasil, Milani (1993) desenvolveu um trabalho com base em estudos teóricos e experimentais utilizando o equipamento de Jenike TSG 70-140. O resultado deste trabalho foi uma proposta de metodologia de ensaio para a determinação das propriedades dos produtos armazenados. Segue abaixo uma tabela com os valores das tensões de pré-cisalhamento ( $P_{pre}$ ) e cisalhamento ( $P$ ) propostos pela metodologia (Tabela 4).

TABELA 4 Valores para tensões de pré-cisalhamento ( $P_{pre}$ ) e cisalhamento (P) propostos por Milani (1993).

Yield Locus 1		Yield Locus 2		Yield Locus 3	
$P_{pre}$ (N)	P (N)	$P_{pre}$ (N)	P (N)	$P_{pre}$ (N)	P (N)
100	70	70	50	50	35
100	50	70	35	50	20
100	35	70	20	50	10

A determinação das propriedades dos produtos armazenados depende do conhecimento dos lugares geométricos de deslizamento (YL), determinados pela relação entre a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) e a tensão normal ( $\sigma$ ) para o produto armazenado como será descrito posteriormente.

## 2.2.5 Determinação das principais propriedades do produto

### 2.2.5.1 Ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno

O ensaio que permite a determinação do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno a partir da máquina de cisalhamento de Jenike seguem os seguintes passos:

- 1° - O produto é acondicionado nos anéis superior e inferior da máquina;
- 2° - Aplicando sobre a tampa dos anéis a carga de pré-cisalhamento (“*pré-shear*”), são feitas 25 translações a fim de se acomodar o produto;
- 3° - A amostra é pré-cisalhada, ou seja, a máquina imprime uma força de cisalhamento à amostra. Esse estágio é interrompido quando a tensão cisalhante atinge o valor máximo ficando constante a partir desse ponto. Este é o momento em que é definido o plano de deslizamento e a amostra atinge o estado de fluxo estável (Figura 8);
- 4° - Aplicando as cargas de cisalhamento (“*shear*”), a amostra será cisalhada. Após o cisalhamento da amostra, os valores de tensão de

cisalhamento  $\tau$  e a tensão de ruptura  $\sigma$  apresentada pelo material são plotados em uma gráfico  $\tau \times \sigma$ . Tais valores são importantes o traçado da reta que define o lugar geométrico de deslizamento (Figura 9).

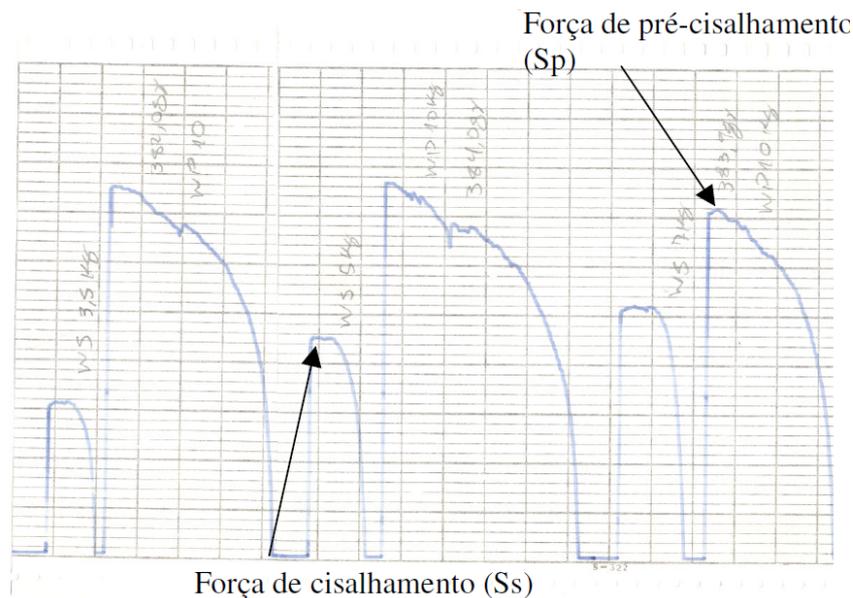


FIGURA 8 Gráfico gerado pelo Plotter.

Fonte: (Teixeira, 2006).

Para entender as propriedades de produtos armazenados e a obtenção dos seus valores a partir da máquina de Jenike é necessário entender os critérios de resistência que apresentam comportamento similar aos solos com algumas particularidades sobre o estado de tensões. Os produtos armazenados seguem o critério de estados limites clássicos de Mohr-Coulomb, ou seja, assume-se uma relação linear entre a tensão normal aplicada sobre o produto e a tensão de cisalhamento impressa pela máquina. Segundo este critério, admite-se que a ruptura ocorra localmente, uma vez atingido um valor-limite da tensão de cisalhamento e esta sendo influenciada pela tensão normal atuante no mesmo plano (Calil Junior & Cheung, 2007).

A Figura 9 ilustra o comportamento do produto dentro da máquina em um típico ensaio de cisalhamento e a Figura 10 representa graficamente o ensaio com a obtenção do lugar geométrico de deslizamento.

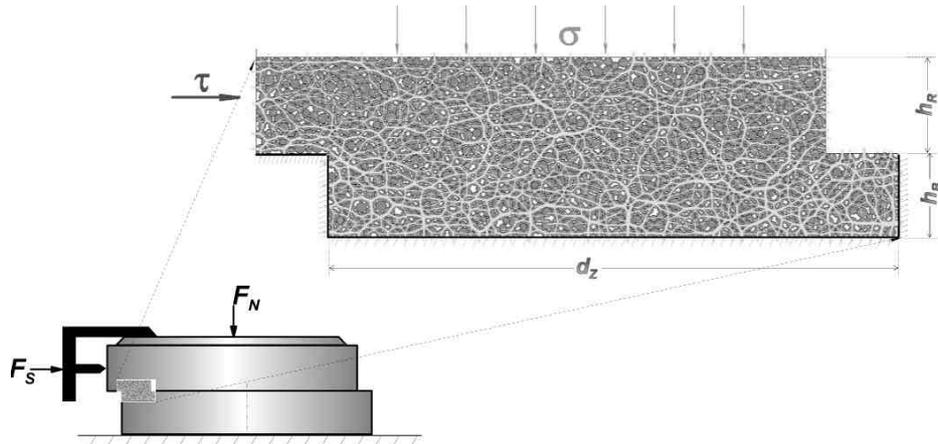


FIGURA 9 Representação do produto dentro dos anéis da máquina de Jenike durante ensaio de cisalhamento.

Fonte: Tykhoniuk et al. (2003).

A Figura 10 mostra que a tensão confinada de ruptura ( $\sigma_c$ ) expressa o maior valor de tensão normal de pré-cisalhamento enquanto que a tensão confinada ( $\sigma_{ic}$ ) corresponde ao maior valor da tensão normal de cisalhamento, após o pré-cisalhamento, quando o semi-círculo de Mohr toca a origem do plano. Para o traçado do maior semi-círculo, o valor de tensão cisalhante de pré-cisalhamento ( $\tau_{pre}$ ) corresponderá a uma tensão normal principal ( $\sigma_p$ ).

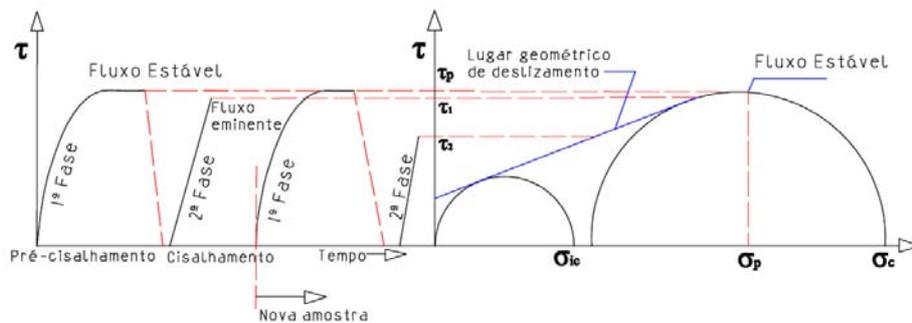


FIGURA 10 Ensaio para a determinação do ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ), do efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ) e da coesão ( $c$ ) do produto.

Adaptado de Schwedes (2002).

Obtidos os valores acima citados podem ser traçados o maior e o menor semi-círculos de Mohr e a reta que caracteriza o lugar geométrico de deslizamento, lugar este tangente aos semi-círculos. O ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ) será o ângulo formado entre a reta que representa o lugar geométrico de deslizamento e a reta das tensões normais (eixo  $x$ ). O efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ) será o ângulo formado entre a linha tangente ao maior semi-círculo passando pela origem (Figura 11).

Os produtos coesivos são aqueles que apresentam, além do atrito interno entre os grãos, uma coesão entre as partículas, gerando um acréscimo de resistência ao cisalhamento. Essa coesão, que é representada pela letra  $c$ , pode ser encontrada estendendo-se o lugar geométrico de deslizamento para interceptar o eixo  $\tau$  (Palma, 2005).

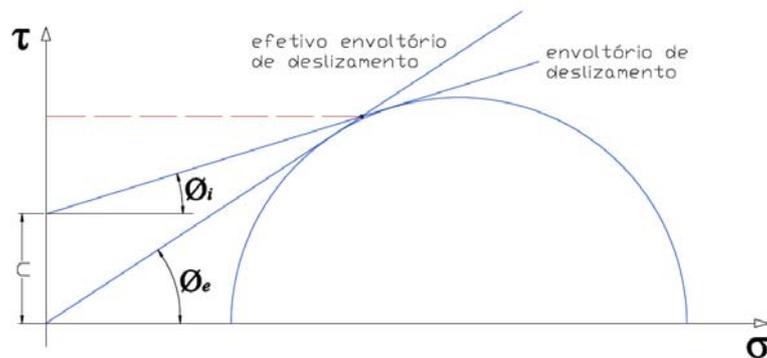


FIGURA 11 Obtenção do ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno.

Fonte: Calil Junior & Cheung (2007).

#### 2.2.5.2 Ângulo de atrito cinemático (dinâmico) com a parede

As pressões dentro de um produto no silo são dependentes do coeficiente de atrito  $\mu$  entre o sólido e a parede do silo. A determinação do atrito do produto armazenado com a parede do silo pode ser feita substituindo-se a base da célula de cisalhamento por uma amostra do material da parede que será avaliada.

Na obtenção do ângulo de atrito com parede, a máquina de Jenike irá imprimir uma tensão de cisalhamento ( $\tau_w$ ) que irá variar com o deslocamento da célula sobre a amostra da parede do silo. Realizando-se este ensaio sob diferentes níveis de tensões de cisalhamento ( $\sigma_w$ ) e plotando-se os pares de valores de  $\tau_w \times \sigma_w$ , obter-se-ão as retas que, passando pela origem do plano cartesiano e os diferentes pontos plotados, resultarão em diversos valores de ângulos. Para critérios de projetos, é importante o valor superior e o inferior encontrados no ensaio (Figura 12).

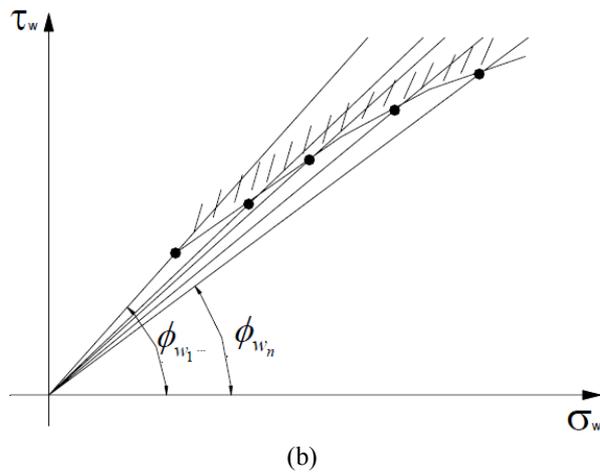
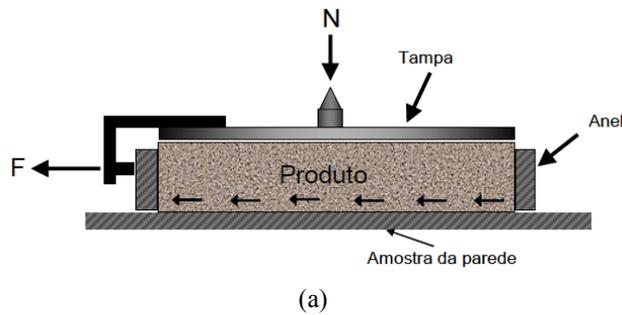


FIGURA 12 Ensaio para determinação das propriedades do produto com a parede. (a) Ilustração do ensaio na célula de Jenike; (b) Plotagem dos valores obtidos pelo ensaio.

Fonte: (Jenike, 1964) citado por (Cheung, 2007).

As Equações 1 e 2 permitem encontrar o coeficiente de atrito  $\mu$  muito importante para a determinação da forma como o produto irá escoar na descarga do silo:

$$\phi_w = \arctan \left( \frac{\tau_w}{\sigma_w} \right) \quad (1)$$

$$\mu_w = \tan \phi_w \quad (2)$$

Para o caso de paredes de chapa ondulada ou trapezoidal, o coeficiente de atrito pode ser um modelo ponderado pelas superfícies de deslizamento como mostrado na Figura 13.

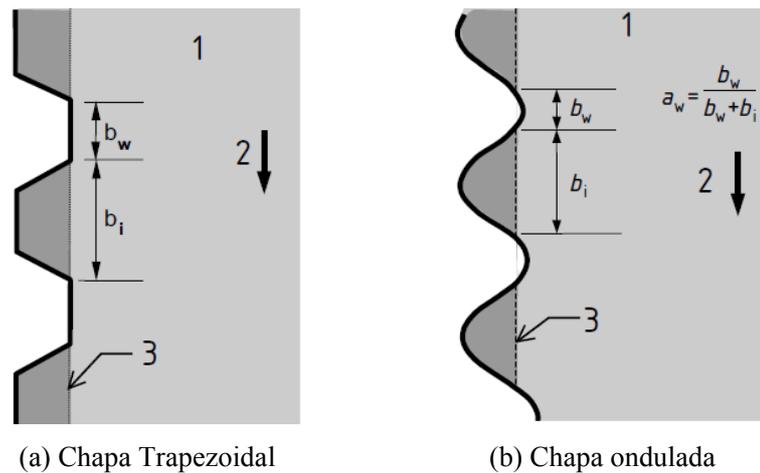


FIGURA 13 Dimensões de perfil de chapa de aço.

Fonte: (BSI, 2006).

A norma EN 1991-4:2006 sugere que o fator de contato entre o produto e a parede do silo em superfícies onduladas e trapezoidais pode ser obtido segundo a equação 3:

$$a_w = \frac{b_w}{b_w + b_i} \quad (3)$$

O efetivo coeficiente de atrito na parede em função do fator de contato  $a_w$  será:

$$\mu_{ef} = (1 - a_w) \tan \phi_i + a_w \mu_w \quad (4)$$

Em que:

$\mu_{ef}$  = efetivo coeficiente de atrito na parede (adimensional);

$\phi_i$  = ângulo de atrito interno(°);

$\mu_w$  = coeficiente de atrito do produto na parede (adimensional);

$a_w$  = fator de contato na parede (adimensional).

A Figura 14 mostra a ponderação da superfície de deslizamento para determinação do coeficiente de atrito segundo a norma AS 3774:1996.

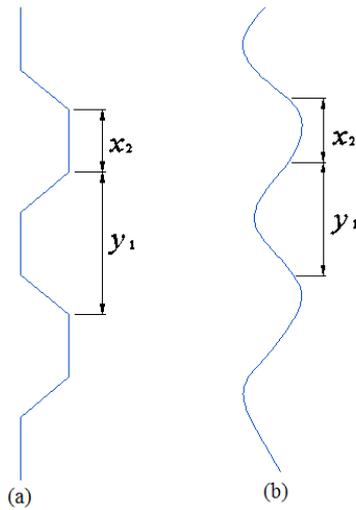


FIGURA 14 Dimensões de perfil de chapa.

Fonte: (AS, 1996).

Segundo a (AS, 1996), o fator de contato  $u_2$  para chapas trapezoidais e o fator de contato  $u_3$  para chapas onduladas pode ser determinado segundo as equações 5 e 6 e o efetivo coeficiente de atrito entre o produto e a parede segundo a equação 7:

$$u_2 = \frac{y_1}{(x_2 + y_1)} \quad (5)$$

$$u_3 = \frac{x_2}{(x_2 + y_1)} \quad (6)$$

$$\mu_{ef} = u_2\mu_i + u_3\mu_w \quad (7)$$

em que:

$\mu_i$  = coeficiente de atrito interno (adimensional).

A norma australiana apresenta ainda, uma tabela (Tabela 5) para os valores típicos de coeficiente de variação das propriedades do produto.

TABELA 5 Valores típicos de coeficiente de variação das propriedades do produto.

Tipo de produto	Coeficiente de variação ( $\delta$ )			
	Efetivo ângulo de atrito interno ( $\theta_i$ )	Ângulo de atrito com a parede ( $\theta_w$ )		
		Rugosidade		
		Tipo D1	Tipo D2	Tipo D3
Farinha de trigo	0,20	0,10	0,10	0,15
Milho	0,10	0,20	0,15	0,10
Areia (Grossa, seca)	0,15	0,20	0,10	0,15
Trigo	0,10	0,20	0,15	0,10

Fonte: (AS, 1996).

### 2.2.5.3 Determinação dos valores característicos superior e inferior

São necessários os valores característicos superior e inferior das propriedades para que as condições de carregamento mais severas sejam obtidas. Se dados experimentais adequados estiverem disponíveis, os valores característicos obtidos por meio de técnicas estatísticas, devem ser determinados. Tais valores são avaliados com probabilidades prescritas e aceitas para não exceder a vida útil do silo ou a permanência do projeto. Testes de dados, embora úteis como base para avaliação de valores característicos, possuem limitações ligadas ao tamanho da amostra, técnica de amostragem, entre outros, podendo fazer com que os dados não representem a maior parcela

das propriedades. Os valores ilustrados na Tabela 5 representam uma mistura de julgamento baseado em experiência e dados experimentais (AS, 1996).

Ainda segundo a norma australiana AS 3774:1996, se o produto não é listado e só dados limitados estão disponíveis, o procedimento seguinte pode ser realizado para obter os valores característicos:

- (a) Calcule a propriedade comum ( $\bar{x}$ ) de dados de teste;
- (b) Selecione o coeficiente de variação ( $\delta$ ) apropriado (Tabela 5 pode ser usada como um guia na ausência de dados);
- (c) Calcule o valor característico superior ( $x_{0,95}$ ) (para,  $0,1 < v < 1,0$ ) pela equação seguinte:

$$x_{0,95} = \bar{x} (1,0 + 1,89\delta) \quad (8)$$

- (d) Calcule o valor característico inferior ( $x_{0,05}$ ) (para,  $0,1 < v < 1,0$ ) pela equação seguinte:

$$x_{0,05} = \bar{x} (0,2 - 0,3 \log_c \delta) \quad (9)$$

Em geral, o coeficiente de variação para o peso específico é aproximadamente 0,10, para o efetivo ângulo de atrito interno está entre 0,10 e 0,25 e para o ângulo de atrito entre o produto e a parede está entre 0,10 e 0,20.

### 2.3 Fluxo

Em projetos de tremonhas é importante a caracterização do tipo de fluxo que irá ocorrer no silo. Calil Junior (1990) ressalta que o tipo de fluxo caracteriza a descarga do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de produto sem movimento e se o silo pode ser esvaziado completamente. Determina também, a distribuição das pressões nas paredes do silo e fundação, e a integridade e custo da construção.

O tipo de fluxo que irá ocorrer depende principalmente das propriedades físicas do produto, assim como, da geometria e rugosidade da superfície da tremonha.

O fluxo pode ser dividido em dois tipos distintos (Palma, 2005):

- **Fluxo de massa:** define-se como o estado de fluxo onde todas as partículas do produto armazenado estão em movimento durante a descarga do silo. Desde o instante inicial da descarga, nenhuma partícula permanece na sua posição original, todas se movem dificultando a formação de zonas estagnadas (Figura 15). Este é o padrão ideal de fluxo uma vez que não necessita de dispositivos para auxiliar a descarga do produto. Pode ser facilmente obtido quando se armazena produtos de fluxo livre como é o caso dos grãos e sementes em umidades ideais para o armazenamento.

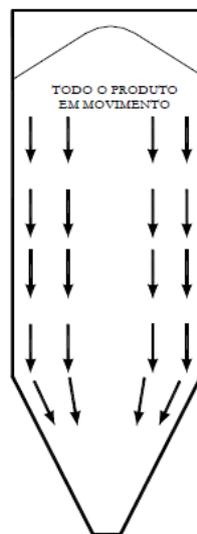


FIGURA 15 Fluxo de massa.

Fonte: Cheung (2007).

- Fluxo de funil:** caracteriza-se pela formação de um canal de fluxo, alinhado com a boca de descarga, envolvido por uma zona na qual o produto permanece estático (zona estagnada). Alguns autores classificam o fluxo de funil em dois tipos sendo que o fluxo pode ser em tubo, quando forma-se um tubo ao longo do silo pelo qual o produto escoa e tubo misto, quando a formação do canal de escoamento do produto se dá apenas em parte do silo. Na parte superior do canal, todo o produto está em movimento (Figura 16).

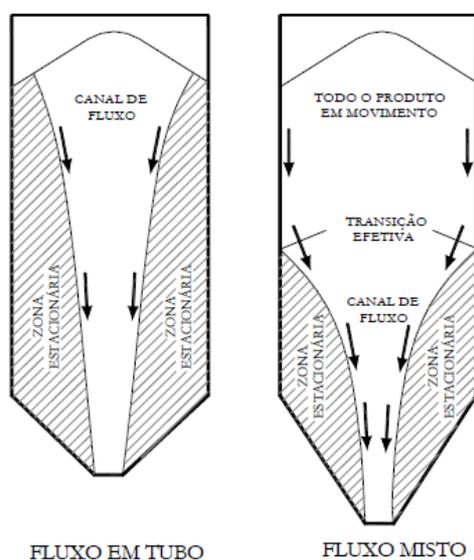


FIGURA 16 Fluxo de funil em tubo e misto.

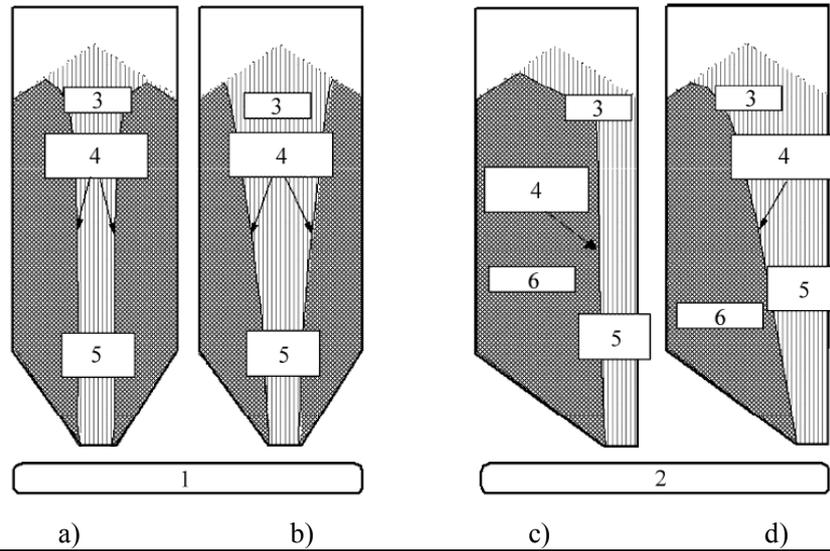
Fonte: Cheung (2007).

No projeto dos silos, o tipo de fluxo e suas características devem permitir a determinação da região de transição efetiva. Esta se caracteriza por ser a região limite entre o produto estagnado e o produto escoando. Quando o produto é de fluxo livre e o silo possui tremonha, não há a formação da região de

transição efetiva uma vez que, nessa situação, ocorre fluxo de massa e todo o produto está se movimentando.

Já em produtos coesivos, a predição exata do local de formação da região de transição efetiva é de difícil determinação. A determinação desta região está sujeita as propriedades físicas dos produtos e de variáveis temporais tais como umidade, temperatura interna do produto, entre outras, além de variar a cada carga e descarga de produto (Palma, 2005).

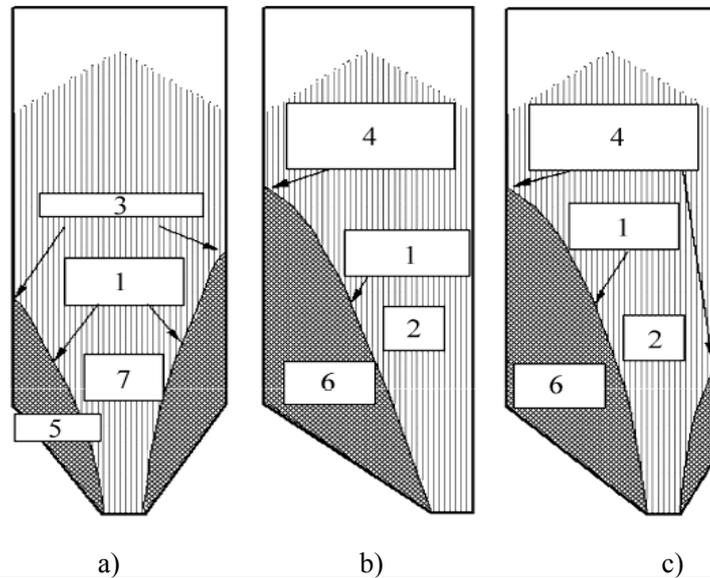
Segundo Calil Junior & Cheung (2007), é importante frisar que a saída excêntrica em silos com fluxo de funil provoca carregamentos assimétricos que podem ser muito problemáticos em silos metálicos por estes possuem paredes de pequena espessura. Chamam a atenção também, para o fato de que mesmo em saídas concêntricas, a transição efetiva pode não ocorrer na mesma altura em todo o perímetro (Figuras 17 e 18).



Legenda:  
 1 Fluxo em tubo interno; 2 Fluxo em tubo excêntrico; 3 Produto fluído;  
 4 Limite do canal de fluxo; 5 Fluxo em tubo; 6 Zona estacionária

FIGURA 17 Características de fluxo em saídas concêntricas e excêntricas. a) Fluxo em tubo paralelo concêntrico; b) Fluxo em tubo inclinado concêntrico; c) Fluxo em tubo paralelo excêntrico; d) Fluxo em tubo inclinado excêntrico.

Fonte: (BSI, 2006).



Legenda:  
 1 Limite do canal de fluxo; 2 Zona de fluxo; 3 Transição efetiva  
 4 Transição efetiva: varia ao redor da circunferência do silo  
 5 Estacionário; 6 Estacionário; 7 Tremonha efetiva

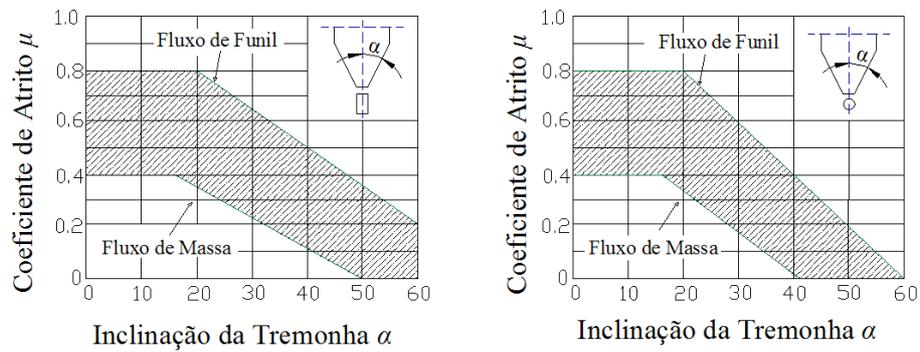
FIGURA 18 Características de fluxo em saídas concêntricas e excêntricas. a) Fluxo misto concêntrico; b) Fluxo misto completamente excêntrico; c) Fluxo misto parcialmente excêntrico.

Fonte: (BSI, 2006).

As principais normas internacionais apresentam geralmente dois gráficos (Figuras 19 e 20) para a determinação do tipo de fluxo que irá ocorrer no silo. Esses gráficos fornecem o tipo de fluxo em função do ângulo ou do coeficiente de atrito com a parede, da inclinação das paredes da tremonha e do tipo de tremonha (geralmente cônicas ou piramidais concêntricas). Nesse tipo de gráfico, o primeiro passo deve ser a escolha do ângulo de inclinação da tremonha ( $\alpha$ ).

Este ângulo deve ser escolhido pelo projetista de acordo com diversos fatores tais como, área a ser construído o silo, altura do mesmo, tipo de produto a ser armazenado e características da forma de descarga (descarga em correias, trens, caminhões, tulas entre outros).

Segundo Calil Junior (1990), na determinação do tipo de fluxo utilizando os gráficos é recomendável diminuir 3° do ângulo de inclinação da tremonha para se obter um padrão de fluxo mais seguro, uma vez que existem incertezas embutidas no processo.

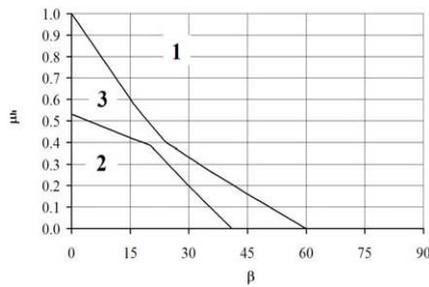


Legenda:

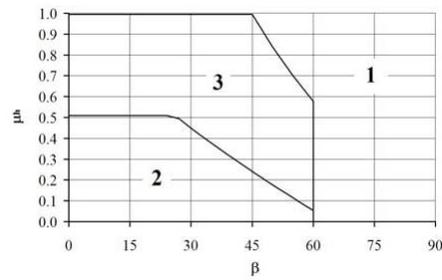
 Zona de Fluxo instável

FIGURA 19 Determinação do tipo de fluxo.

Fonte: (AS, 1996).



a) Tremonha cônica



b) Tremonha em cunha

Legenda:  
 1 Fluxo de Funil; 2 Fluxo de massa; 3 Fluxo de massa ou funil pode ocorrer  
 $\beta$  Ângulo de inclinação da tremonha;  $\mu_h$  Coeficiente de atrito

FIGURA 20 Determinação do tipo de fluxo.

Fonte: (BSI, 2006).

### 2.3.1 Vantagens e desvantagens do tipo de fluxo

A Tabela 6 lista algumas vantagens e desvantagens de cada tipo de fluxo com o intuito de auxiliar na escolha do modelo de acordo com as exigências do projeto.

TABELA 6 Comparação entre padrões de fluxo.

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

Fonte: Calil Junior & Cheung (2007).

### 2.3.2 Obstruções de fluxo

A obstrução do fluxo nos silos ocorre quando o produto adquire resistência suficiente para suportar seu próprio peso devido a consolidação, devido ao arranjo das partículas ou simplesmente devido a força de coesão e/ou adesão entre as partículas. Basicamente a obstrução ao fluxo possui dois tipos:

- Obstrução em tubo
- Obstrução em arco (mecânico ou coesivo)

Essas obstruções causam sérios danos aos silos e principalmente a tremonha danificando a boca de descarga e as paredes laterais. Dependem principalmente das propriedades físicas dos produtos armazenados, da geometria do silo e tremonha e de seus materiais constituintes (Araújo, 1997).

Para a análise das obstruções é importante conhecer dois parâmetros muito importantes que são a função fluxo (FF) e o fator fluxo da tremonha (*ff*). O primeiro descreve a capacidade do produto de fluir durante a descarga do silo e o segundo está ligado às características do silo (geometria e ângulo de atrito com a parede).

### 2.3.3 Função fluxo

Segundo Calil Junior & Cheung (2007) no projeto de um silo, a FF deve ser conhecida sob as mais severas condições para prevenção de problemas de fluxo. Os produtos geralmente estão em altas umidades, altas temperaturas e são armazenados por um longo período de tempo o que contribui para aumentar as dificuldades na obtenção da FF.

A FF é caracterizada como a relação entre a tensão principal de consolidação  $\sigma_1$ , que é a máxima tensão de consolidação no semi-círculo de Mohr, e a tensão confinada de ruptura  $\sigma_{ic}$ .

$$FF = \frac{\sigma_1}{\sigma_{ic}} \quad (10)$$

Para uma rápida análise da fluidez do produto, podem-se tomar os seguintes valores-límites da FF apresentados por Jenike (1964):

FF < 2 – produtos muito coesivos não fluem

2 < FF < 4 – produtos coesivos

4 < FF < 10 – produto que flui facilmente

$FF > 10$  – produto de fluxo livre  $\phi_w$ .

Para amostras com tempo de consolidação  $t$ , sua tensão inconfínada é maior que para um produto não consolidado. Isso se deve ao fato de alguns materiais apresentarem resistência inconfínada com o tempo. Tal fato é característico de produtos coesivos.

### 2.3.4 Fator fluxo da tremonha

Para o cálculo do fator fluxo é necessário conhecer o efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ), o ângulo de atrito do produto com a parede ( $\phi_w$ ), a geometria e a inclinação da tremonha ( $\alpha$ ). O fator fluxo é uma constante para uma dada tremonha e, para efeitos de projeto, pode ser representado graficamente como mostrado na Figura 21.

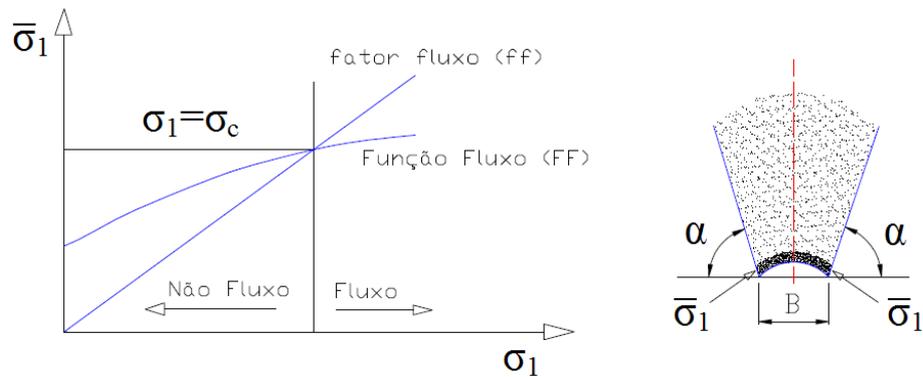


FIGURA 21 Função Fluxo (FF) e fator fluxo ( $ff$ ) da tremonha (Condição para fluxo de massa).

Fonte: (Araújo, 1997).

Para a determinação do fator fluxo, (Jenike, 1964), propôs a teoria do campo de tensões radiais para determinar, perto da saída da tremonha, o campo

de tensões durante o esvaziamento. Com o objetivo de prever a mínima dimensão da boca da tremonha e a obstrução por arcos coesivos, introduziu o critério de fluxo e não-fluxo, porém, esta teoria leva a cálculos de sistemas de equações diferenciais parciais ordinárias e requer um método numérico de resolução.

As resoluções das equações de Jenike foram publicadas em gráficos de fatores de fluxo para silos de diferentes geometrias.

O fator fluxo da tremonha é a relação entre a tensão de consolidação  $\sigma_1$  e a tensão atuando em um arco estável imaginário  $\sigma_1'$ .

$$ff = \frac{\sigma_1}{\sigma_1'} \quad (11)$$

Gaylord Junior & Gaylord (1984) sugerem que o fator fluxo da tremonha seja determinado segundo as equações:

$$ff = \frac{1 + \text{sen}\phi_e}{\Delta} \quad \alpha + \phi_w \geq 45^\circ \quad (12)$$

$$ff = \frac{1 + \text{sen}\phi_e}{\Delta} \cdot \text{sen}2(\alpha + \phi_w) \quad \alpha + \phi_w < 45^\circ \quad (13)$$

em que:

$$\Delta = 2 \cdot \text{sen}\phi_e \cdot \text{sen}2(\alpha + \varepsilon) - \tan \alpha \cdot [1 - \text{sen}\phi_e \cdot \cos 2(\alpha + \varepsilon)] \quad (14)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left( \phi_w + \text{sen}^{-1} \frac{\text{sen}\phi_w}{\text{sen}\phi_e} \right) \quad (15)$$

### 2.3.5 Obstrução em “tubo”

A obstrução do tipo “tubo” normalmente ocorre em silos com fluxo em funil ou quando a consolidação do produto aumenta com o tempo de armazenagem. A formação de tubos estáveis depende do desenvolvimento da coesão e/ou adesão no produto (Figura 22).

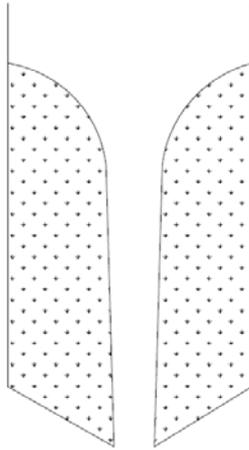


FIGURA 22 Obstrução em tubo.

Para evitar a obstrução do fluxo por formação de tubo é necessário que a tremonha tenha uma dimensão mínima da boca de descarga. Essa dimensão será responsável em quebrar o estado de coesão interna e provocar a ruptura da massa de grãos coesa.

#### **2.3.5.6 Obstrução em “arco”**

Uma obstrução comum de ocorrer em silos é quando ocorrem arcos estáveis próximos à boca da tremonha causando o bloqueio total do fluxo ou um fluxo irregular. Este tipo de obstrução é chamada de obstrução em arco (Figura 23) e pode ser formada por arco mecânico quando o produto apresenta um arranjo dos grãos capaz de obstruir a boca da tremonha ou arcos coesivos quando o produto apresenta coesão entre as partículas próximo a boca de descarga.

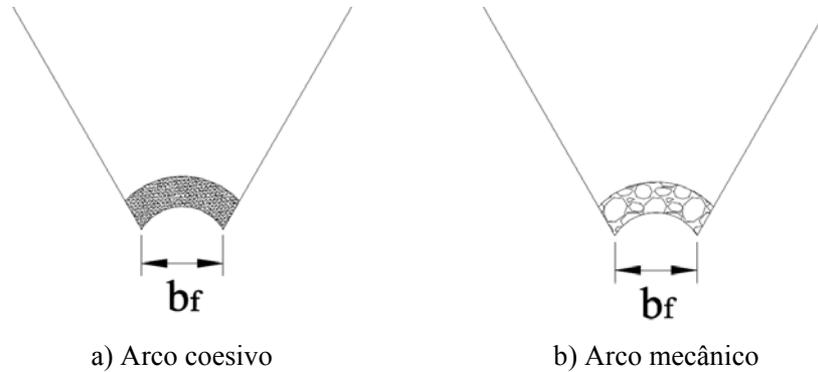


FIGURA 23 Obstrução em arcos, mecânico e coesivo.

### 2.3.5.7 Determinação da dimensão mínima da boca de descarga

A determinação das dimensões da boca de descarga da tremonha deve ser feita segundo o tipo de fluxo previsto no projeto. Portanto, tanto para fluxo de massa quanto para fluxo de funil deve ser determinado uma dimensão mínima da boca de descarga ( $b_{min}$ ).

#### 2.3.5.7.1 Dimensão mínima da boca de descarga para fluxo de massa

$$b_{min} = \frac{H(\alpha) \cdot \sigma_{crit}}{\gamma_i} \quad (16)$$

sendo:

$\sigma_{crit}$  = o valor de tensão crítica;

$\gamma_i$  = o valor inferior da densidade do produto;

$H(\alpha)$  = uma função dependente da forma geométrica e da inclinação da tremonha, segundo Jenike (1964). A Figura 24 mostra o gráfico para determinação de  $H(\alpha)$ .

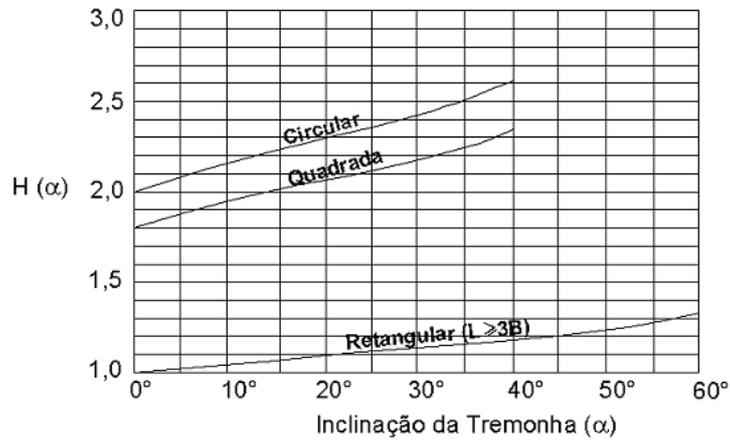


FIGURA 24 Determinação da função  $H(\alpha)$  para tremonhas cônicas e em cunha.

Fonte: (Jenike, 1964).

Com o intuito de evitar instabilidades que alterem o tipo de fluxo, Jenike (1964) recomenda que a dimensão mínima da boca de descarga dada pela equação (16) seja majorada em 20%.

Com boa aproximação, Jenike & Johanson (1965) citado por Gaylord Junior & Gaylord (1984), sugerem as seguintes equações:

$$b_{\min} \geq \frac{2,2 \cdot \sigma_{crit}}{\gamma_i}, \text{ para bocas de descarga circulares.} \quad (17)$$

$$b_{\min} \geq \frac{1,3 \cdot \sigma_{crit}}{\gamma_i}, \text{ para bocas de descarga retangulares.} \quad (18)$$

### 2.3.5.7.2 Dimensão mínima da boca de descarga para fluxo de funil

$$b_{f \min} = \frac{G(\phi_i) \cdot \sigma_{crit}}{\gamma_i} \quad (19)$$

A função  $G(\phi_i)$  é denominada fator de tubo e pode ser determinada pelo gráfico proposto por Jenike (1964) (Figura 25).

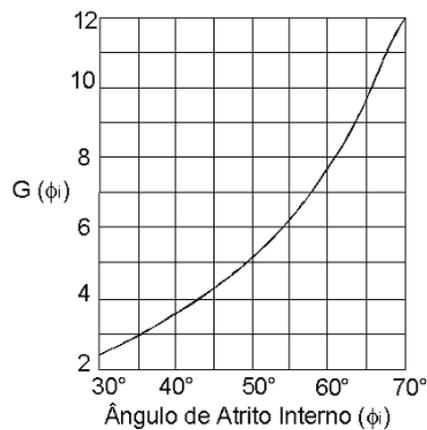


FIGURA 25 Determinação da função  $G(\phi_i)$ .

Fonte: Jenike (1964).

Em se tratando de bocas de descarga circular ou quadrada, de silos com fluxo de funil, a determinação de  $b_f$  é suficiente para garantir que não haverá formação de obstruções em arco e em tubo.

Já em bocas de descarga retangulares, torna-se necessário a determinação da outra dimensão ( $b_p$ ) para evitar a obstrução em arco.

Roberts et al. (1987) recomenda um fator de fluxo de  $ff = 1,7$  para determinação de  $b_p$ . Para tanto, o maior valor do efetivo ângulo de atrito interno será determinado com o ângulo de inclinação da tremonha  $\alpha = 30^\circ$ . Portanto, simplificando a equação para  $\alpha = 30^\circ$ , ter-se-á:

$$b_p = \frac{1,15 \cdot \sigma_{crit}}{\gamma_i} \quad (20)$$

sendo que:

$\sigma_{crit}$  também será obtido para um  $ff = 1,7$ .

### 2.3.5.8 Determinação da inclinação das paredes da tremonha

Gaylord Junior & Gaylord (1984) sugerem que a determinação da inclinação das paredes de tremonhas piramidais para fluxo de massa seja feito segundo a equação:

$$\tan^2 \alpha = \tan^2 \alpha_1 + \tan^2 \alpha_2 \quad (21)$$

em que:

$\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são ângulos das paredes de união da tremonha.

Destacam ainda que, para o fluxo de funil, as paredes da tremonha não são diretamente afetadas pelo padrão de fluxo, porém, segundo Calil Junior (1990), pode-se aplicar o seguinte equacionamento como referência:

$$\alpha = 65 - \phi_{ws} \quad (22)$$

em que:

$\alpha$  = ângulo de inclinação da tremonha (°);

$\phi_{ws}$  = ângulo superior de atrito entre o produto e a parede do silo (°).

Ainda segundo Calil Junior (1990), tendo como objetivo considerar possíveis instabilidades de fluxo, deve-se diminuir 3° do ângulo de inclinação determinado graficamente ou por equações.

## **2.4 Pressões em paredes de tremonhas**

Araújo (1997) trabalhando em dois modelos de tremonhas centradas, em escala real, um enrijecido e outro não enrijecido, e aplicando carregamentos nos modelos, tendo areia como produto, avaliou as pressões nas paredes das tremonhas. Nesse trabalho, foram utilizadas três formas de avaliação das pressões, sendo uma análise experimental através de sensores *strain gage* fixados nas paredes da tremonha e estruturas de sustentação além de LVDT's para medição de deslocamentos das peças. Realizou-se também uma análise teórica através de equações propostas por diversas teorias e normas e uma análise computacional através do *software* ANSYS que trabalha com o método dos elementos finitos (MEF) para análise estrutural. Como resultados, Araújo (1997) constatou que os métodos computacionais apresentaram valores ligeiramente superiores aos valores experimentais enquanto que os resultados analíticos, através de normas e teorias, levaram a um superdimensionamento da estrutura.

### **2.4.1 Pressões em paredes de tremonha pelo método de Baikov**

No método de Baikov (Método das Projeções), as pressões estáticas normais (horizontais)  $p_n$  e verticais  $p_v$  sobre as paredes inclinadas da tremonha podem ser calculadas pelas equações de Janssen (1895) partindo do equilíbrio estático de uma fatia elementar no corpo do silo (Figura 26).

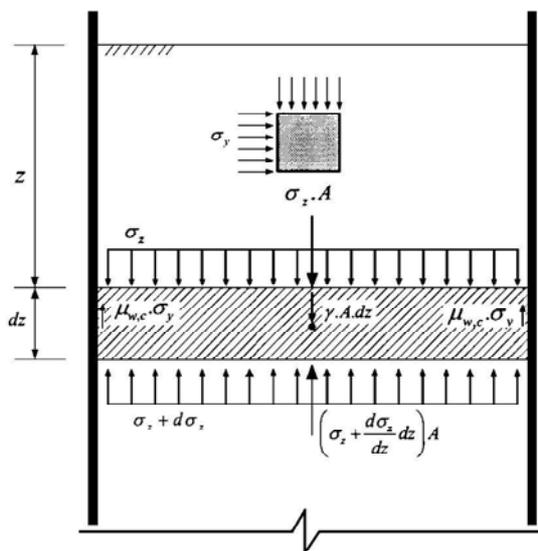


FIGURA 26 Equilíbrio estático de uma fatia elementar proposto por Janssen (1895).

Fonte: Araújo (1997).

- Pressão horizontal:

$$p_n(z) = \frac{\gamma \cdot R}{\mu_{w.c}} + \left( \sigma_{y,o} - \frac{\gamma \cdot R}{\mu_{w.c}} \right) \cdot e^{-\frac{K \cdot \mu_{w.c} \cdot z}{R}} \quad (23)$$

sendo:

$p_n(z)$  = pressão horizontal de Janssen (kPa);

$\gamma$  = peso específico do produto armazenado ( $\gamma = \rho \cdot g$ ) (kN.m<sup>-3</sup>);

$R$  = raio hidráulico  $\left( R = \frac{A}{U} \right)$  (m);

$\mu_{w.c}$  = coeficiente de atrito da parede ( $\mu_{w.c} = \tan(\phi_{w.c})$ ) (adimensional);

$\sigma_{y,o}$  = tensão normal na direção Y (kN.m<sup>-2</sup>);

$K$ = relação entre as pressões horizontais e verticais. O valor de  $K$  não é especificado por Janssen porém, várias teorias como a de Walker (1966); Rankine (1857); Hartmann (1966), entre outros, citados por Reimbert & Reimbert (1979), fornecem uma base para o cálculo de  $K$  (adimensional);  
 $Z$ = profundidade (m).

- Pressão vertical:

$$p_v(z) = \frac{\gamma \cdot R}{K \cdot \mu_{w.c}} \left( 1 - e^{-\frac{K \cdot \mu_{w.c} \cdot z}{R}} \right) \quad (24)$$

No método de Baikov o raio hidráulico ( $R$ ) pode variar ao longo da altura da tremonha, mas ele é usualmente considerado constante e igual ao da seção transversal do corpo do silo.

As pressões, normal  $p_{NT}$  e tangencial  $p_{TT}$  na superfície média das paredes de uma tremonha, foram determinadas fazendo-se a decomposição em  $p_n$ ,  $p_v$  e  $q$  (Figura 27).



condição de produto estático como no dinâmico sendo que, no estado dinâmico (descarga), a teoria baseia-se nas seguintes hipóteses:

- 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;
- O produto deve escorregar e ser capaz de deslocar independentemente das variações de seções transversais da tremonha;
- O produto terá características de fluxo de massa;
- Supõe-se que as pressões verticais sobre um mesmo plano horizontal são constantes.

As duas primeiras hipóteses podem ser representadas pelo Círculo de Mohr que tangencia o lugar geométrico de deslizamento do produto representado pela reta OP (Figura 27b). A partir da terceira hipótese, as tensões devem ser representadas por um ponto do lugar geométrico de deslizamento da parede OW.

A Figura 28a apresenta a decomposição das pressões na parede inclinada da tremonha.

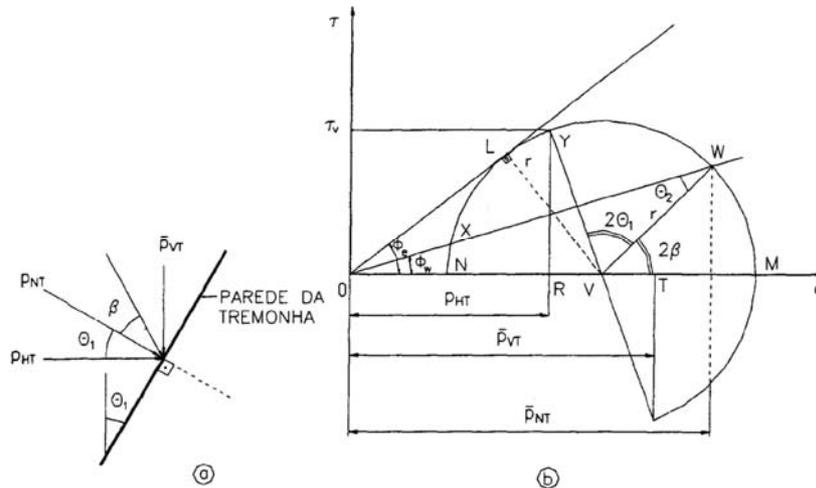


FIGURA 28 a) Pressões sobre a parede; b) Círculo de Mohr.

Fonte: Walker (1966).

#### 2.4.2.1 Pressões estáticas na tremonha

Para o campo de tensões na tremonha, admite-se que a pressão principal maior está na vertical. Dois casos são considerados:

1º Caso - Se:  $\text{sen}\phi_e \geq \frac{\text{sen}\phi_w}{\text{sen}(\phi_w + 2\alpha)}$ , então:

$$p_{NT,e} = \gamma \cdot z \cdot \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha + \tan \phi_w} \quad (27)$$

$$p_{TT,e} = p_{NT,e} \cdot \tan \phi_w = p_{NT,e} \cdot \mu \quad (28)$$

2º Caso - Se:  $\text{sen}\phi_e \leq \frac{\text{sen}\phi_w}{\text{sen}(\phi_w + 2\alpha)}$ , então:

$$p_{NT,e} = \gamma \cdot z \cdot \frac{1 - \text{sen}\phi_e \cos 2\alpha}{1 + \text{sen}\phi_e} \quad (29)$$

$$p_{TT,e} = \gamma \cdot z \cdot \frac{\text{sen}\phi_e \cdot \text{sen}2\alpha}{1 + \text{sen}\phi_e} \quad (30)$$

#### 2.4.2.2 Pressões de descarga (dinâmicas) na tremonha

Na descarga, admite-se que o produto em estado de deslizamento promova as maiores pressões possíveis sobre a parede da tremonha.

$$\frac{p_{NT,d}}{p_{VT,d}} = \frac{1 + \text{sen}\phi_e \cdot \cos \varepsilon_2}{1 - \text{sen}\phi_e \cdot \cos(2\alpha + \varepsilon_2)} \quad (31)$$

em que:

$$\varepsilon_2 = \phi_w + \text{sen}^{-1} \frac{\text{sen}\phi_w}{\text{sen}\phi_e} \quad (32)$$

Considerando o equilíbrio de forças verticais numa camada horizontal de produto a uma distância  $z'$  acima do vértice (ápice) da tremonha e assumindo que a pressão vertical seja uniformemente distribuída (Figura 29), tem-se:

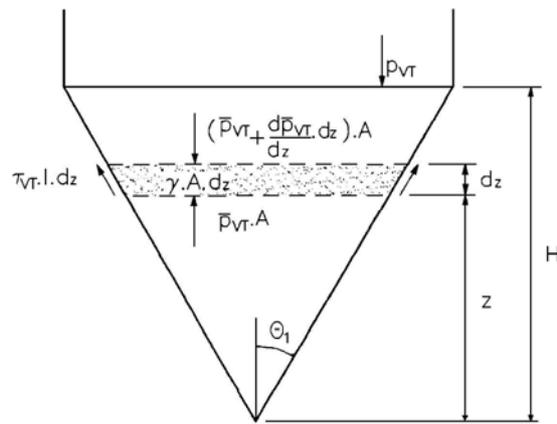


FIGURA 29 Equilíbrio de forças na tremonha.

Fonte: Walker (1966).

$$p_{VT,d} = \frac{\gamma \cdot h_{cn}}{(K_w - 1) h_{cn}} \frac{z'}{h_{cn}} + \left( p_{V,tr} - \frac{\gamma \cdot h_{cn}}{K_w - 1} \right) \left( \frac{z'}{h_{cn}} \right)^{K_w} \quad (33)$$

em que:

$$K_w = \frac{1 + m \frac{\text{sen}\phi_e \cdot \text{sen}(2\alpha + \varepsilon_2)}{\tan \alpha} - \text{sen}\phi_e \cdot \cos(2\alpha + \varepsilon_2)}{\tan \alpha} \quad (34)$$

sendo:

$m = 0$  para tremonhas em cunha;

$m = 1$  para tremonhas cônicas ou piramidais;

$z'$  = distância a partir do vértice da tremonha (m);

$h_{cn}$  = altura do cone (m);

$p_{V,tr}$  = pressão vertical dinâmica na transição (kPa).

#### 2.4.3 Pressões em paredes de tremonha - AS 3774-1996

Em se tratando de norma para recomendações de cálculo das pressões em paredes de tremonha, destaca-se a norma AS 3774-1996 intitulada “*Loads on Bulk Solids Containers*” por se tratar de uma norma bastante completa.

Para a determinação das pressões que ocorrem nas paredes da tremonha, a AS3774:1996 sugere que seja feita uma decomposição das pressões tal como mostrado na Figura 30.

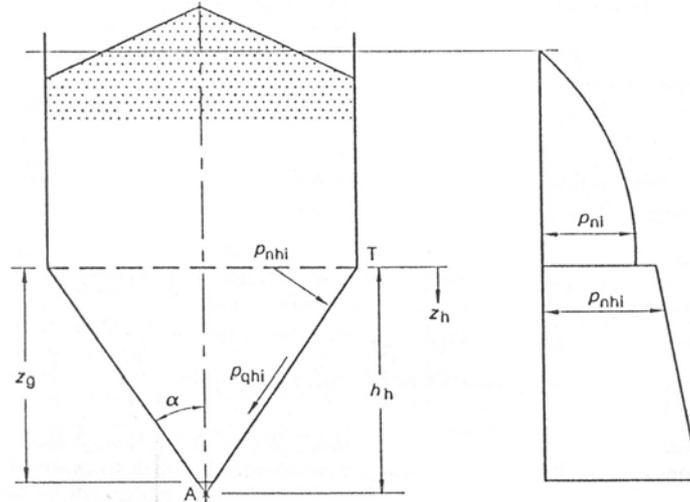


FIGURA 30 Decomposição das pressões segundo AS 3774:1996.

O procedimento para determinação das pressões segundo a referida norma é descrito nas equações (35) a (44).

Pressões normais em paredes de tremonha:

$$p_{nhi} = K_h \cdot (\gamma \cdot z_h + p_{vit}) \quad (35)$$

Sendo:

$p_{nhi}$  = pressão normal inicial (estática) na parede da tremonha (kPa);

$K_h$  = relação das pressões horizontais e verticais (adimensional);

$$K_h = \tan \alpha \cdot (\tan \alpha + \mu_h)^{-1} \quad (36)$$

$\alpha$  = ângulo de inclinação da tremonha (°);

$\gamma$  = peso específico do produto armazenado, valor superior ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ );

$z_h$  = altura vertical da tremonha (m);

$p_{vit}$  = pressão vertical média quando  $z = h_o + h_c$  (kPa);

$$p_{vi} = \frac{\gamma \cdot r_c \cdot c_z}{\mu \cdot K_l} \quad \text{para tipo A2 e A3} \quad (37)$$

$$p_{vi} = \gamma \cdot z \quad \text{para tipo A1} \quad (38)$$

sendo:

$r_c$  = dimensão característica ( $0,25 \cdot d_c$  para tremonhas circulares e quadradas) (m).

$$c_z = 1 - e^{(-z/z_o)} \quad (39)$$

$K_l$  = valor característico inferior da relação de pressão lateral

$$K_l = \frac{1 + \text{sen}^2 \phi_{es} - 2\sqrt{(\text{sen}^2 \phi_{es} + \mu_i^2 \cos^2 \phi_{es})}}{4\mu_i^2 + \cos^2 \phi_{es}} \quad (40)$$

$z$  = altura efetiva do silo (m).

$$z_o = r_c \cdot (\mu \cdot K_l)^{-1} \quad (41)$$

Pressões normais em paredes verticais:

$$p_{nf} = c_{nf} \cdot p_{ni} \quad (42)$$

Quando o valor de  $c_{nf}$  for o maior entre:

$$c_{nf} = \left[ 7,6 \cdot (h_b \cdot d_c^{-1})^{0,06} - 6,4 \right] \cdot c_c \quad (43)$$

e,

$$c_{nf} = 1,2c_c \quad (44)$$

sendo:

$p_{nf}$  = pressão normal na parede durante o fluxo (kPa);

$c_{nf}$  = multiplicador de pressão normal na parede (adimensional);

$p_{ni}$  = pressão inicial normal na parede (kPa);

$h_b$  = altura total efetiva da massa de grãos armazenados (m);

$d_c$  = diâmetro do silo (m).

$c_c$  = coeficiente de fluxo geométrico (1,0 para fluxo axissimétrico e 1,2 para fluxo planar) (adimensional).

#### 2.4.4 Pressões em paredes de tremonha - EN 1991-4:2006

A norma europeia EN 1991-4:2006 sugere dois métodos distintos de se calcular as pressões em paredes de tremonhas, podendo ser utilizada qualquer um destes de acordo com a necessidade de cada projeto.

##### 2.4.4.1 Primeiro método de cálculo das pressões em tremonhas - EN 1991-4:2006

Segundo esta forma, a decomposição das pressões segue o modelo proposto na Figura 31.

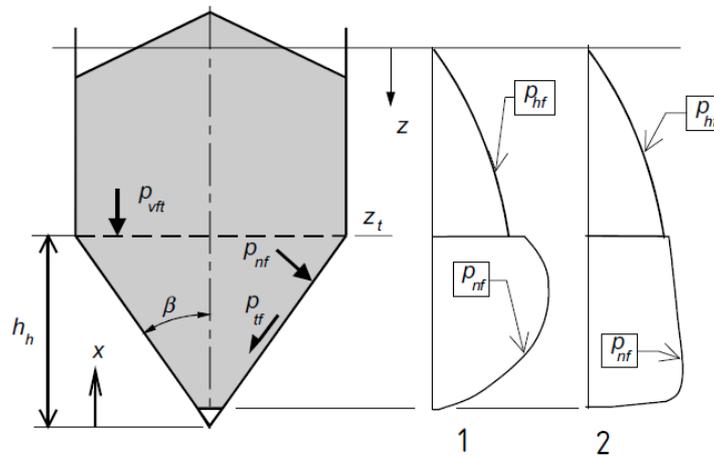


FIGURA 31 Decomposição das pressões segundo EN 1991-4:2006.

A fim de se determinar o valor de  $p_{nf}$  a norma sugere os seguintes equacionamentos:

$$p_{nf} = F_f \cdot p_v \quad (45)$$

em que:

$$F_f = 1 - \frac{b}{\left(1 + \frac{\tan \beta}{\mu_h}\right)} \quad (46)$$

sendo:

$\beta$  = inclinação da parede da tremonha ( $^\circ$ );

$b$  = coeficiente empírico;  $b = 0,2$  (adimensional);

$\mu_h$  = valor característico inferior do coeficiente de atrito entre produto e parede da tremonha. (adimensional).

$$p_v = \left(\frac{\gamma_h \cdot h_h}{n-1}\right) \left\{ \left(\frac{x}{h_h}\right) - \left(\frac{x}{h_h}\right)^n \right\} + P_{vft} \left(\frac{x}{h_h}\right)^n \quad (47)$$

sendo:

$\gamma_h$  = valor característico superior do peso específico ( $\text{kN.m}^{-3}$ );

$h_h$  = altura vertical da tremonha (m);

$x$  = coordenada vertical da pressão na tremonha (m);

$S$  = coeficiente ligado ao formato da tremonha;  $S = 2$  para tremonhas cônicas e piramidais (adimensional).

$$n = S(F \mu_{heff} \cot \beta + F) - 2 \quad (48)$$

$$\mu_{heff} = \mu_h \quad (49)$$

$$F = F_f \quad (50)$$

$$P_{vft} = C_b P_{vf} \quad (51)$$

sendo:

$C_b = 1,0$  para silos de classe 2 e 3 (valor para situação estática).

$C_b = 1,2$  para silos de classe 1 (valor para situação estática).

$$P_{vf} = \gamma z_v \quad (52)$$



$$P_n = P_{n3} + P_{n2} + (P_{n1} - P_{n2}) \frac{x}{l_h} \quad (56)$$

sendo:

$l_h$  = comprimento da parede da tremonha (m);

$x$  = altura relativa na tremonha (m).

$$P_{n3} = 3,0 \frac{A}{U} \frac{\gamma K}{\sqrt{\mu_h}} \cos^2 \beta \quad (57)$$

$$K_m = 1,1(1 - \sin \phi_{im}) \quad (58)$$

$$P_{n2} = p_{vfi} C_b \sin^2 \beta \quad (59)$$

$C_b = 1,3$  (estado estático) ou  $1,6$  (estado dinâmico) (adimensional).

$$P_{n1} = p_{vfi} (C_b \sin^2 \beta + \cos^2 \beta) \quad (60)$$

#### 2.4.5 Pressões em paredes de tremonhas excêntricas

Em se tratando de pressões nas paredes de tremonhas excêntricas percebemos uma carência de estudos em todo o mundo. Atualmente podemos destacar alguns trabalhos realizados por Guaita et al. (2003) na área de simulação destas pressões através de softwares que utilizam o método dos elementos finitos (MEF).

No Brasil, ainda não houve relatos de estudos mais detalhados sobre as pressões em paredes de tremonhas quando estas apresentam excentricidade na sua boca de descarga. No entanto, a norma australiana AS 3774-1996 e a européia EN 1991-4:2006, recentemente revisada e ampliada, podem servir como boas referências para se discutir tais pressões. Vale ressaltar que apenas a AS 3774-1996 possui referências para mensuração das pressões quando as tremonhas são excêntricas. A norma EN 1991-4:2006 sugere apenas um equacionamento para as paredes do silo quando este possui descarga excêntrica.

Nas equações (61) a (65) seguem as recomendações da AS 3774-1996 para o cálculo das pressões de excentricidade.

#### 2.4.5.1 Pressões em tremonhas excêntricas - AS 3774-1996

As pressões em tremonhas excêntricas podem ser calculadas segundo critérios da AS3774:1996 considerando as pressões normais em paredes verticais. As pressões de projeto dependerão da excentricidade de saída ( $e_o$ ) relativa à dimensão da tremonha ( $d_c$ ). Excentricidades menores que  $0,1d_c$  não são consideradas como excentricidade efetiva. Na superfície da parede mais afastada (diametralmente oposta à saída) é considerado um aumento de pressão a uma altura ( $h_D$ ) sobre a saída e se estendendo além da altura ( $d_c$ ). A altura  $h_D$  pode ser obtida segundo a equação:

$$h_D = (0,5d_c + e_o) \tan \phi_i \quad (61)$$

O máximo aumento de pressão ( $P_{ef,max}$ ) pode ser determinado segundo a equação:

$$P_{ef,max} = P_{nf} \left( \frac{e_o}{d_c} - 0,1 \right) \geq 0 \quad (62)$$

Próximo à superfície da parede lateral (perto da saída) é considerado uma redução de pressão começando no nível da boca de descarga e se estendendo a uma altura  $d_e$  (Figura 33). Para tremonhas cônicas, a redução de pressão será constante e se estenderá ao redor da circunferência a uma distância  $d_e/2$  no lado próximo ao eixo de excentricidade, sendo:

$$d_e = 1,83d_c \left( 1 - 1,43 \frac{e_o}{d_c} \right) \quad (63)$$

A redução de pressão ( $P_{ef,red}$ ) pode ser determinada segundo a equação:

$$P_{ef,red} = 1,5P_{nf} \left( \frac{e_o}{d_c} - 0,1 \right) \quad (64)$$

Para tremonhas cônicas, a origem da coordenada circunferencial ( $\beta$ ) é tomada no eixo de excentricidade próximo ao lado da menor parede da tremonha. A região de redução de pressão definida na equação (64) pode ser redefinida em termos de sua extensão angular. Para tal, determina-se um novo ângulo circunferencial a partir do eixo central em direção ao eixo de excentricidade próximo ao menor lado da tremonha (Figura 33). O valor de  $\beta_e$  é determinado segundo a equação:

$$\beta_e = 105 - 150 \left( \frac{e_o}{d_c} \right) \quad (65)$$

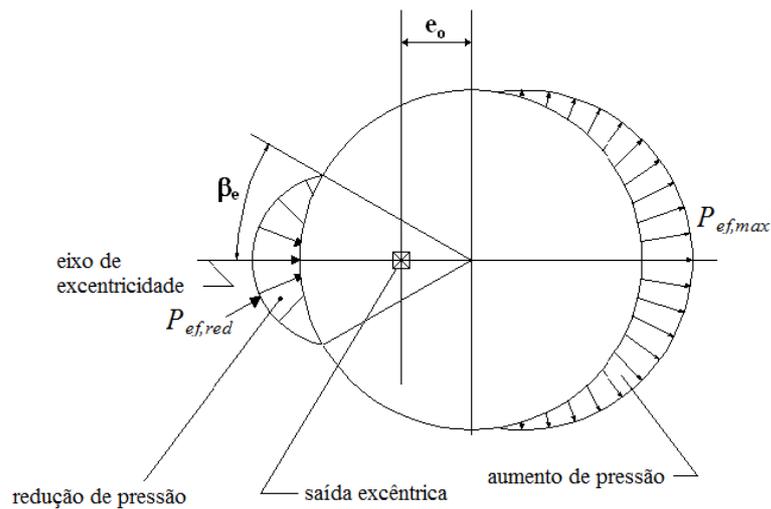


FIGURA 33 Representação do ângulo circunferencial na tremonha e da região de redução e aumento das pressões.

Fonte: (AS, 1996).

Na Figura 34 são ilustradas as zonas formadas durante a descarga de um silo com tremonha excêntrica, as regiões de redução e aumento de pressão e dimensões consideradas para o cálculo destas pressões.

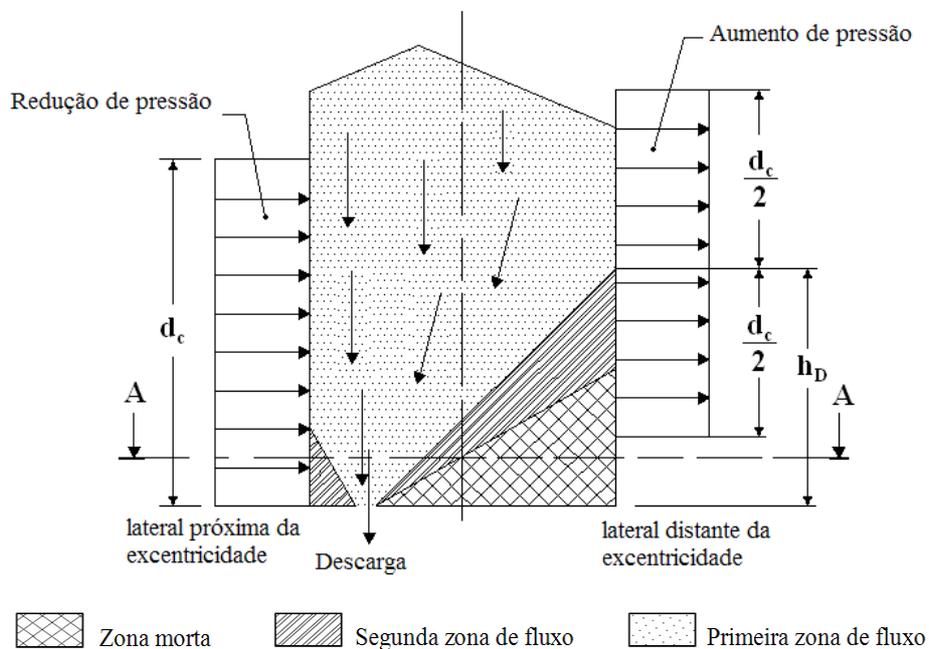


FIGURA 34 Distribuição das pressões de excentricidade.

Fonte: (AS, 1996).

#### 2.4.5.2 Pressões em tremonhas excêntricas – Guaita et al. (2003)

Trabalhando com simulação numérica das pressões na parede durante a descarga do material granular a partir de silos cilíndricos com tremonhas excêntricas, Guaita et al. (2003) chamam a atenção para o fato de que dentro das teorias tradicionais tem havido várias tentativas de obtenção de expressões matemáticas que reflitam as sobrepressões produzidas devido à descarga excêntrica. Ainda segundo os autores, estas começam a partir do cálculo das tensões em uma condição estática concêntrica, fazendo algumas correções devido à excentricidade da saída e, em seguida, aplicando coeficientes ampliados à condição de descarga, obtendo outras equações para satisfazer o equilíbrio estático.

Tanto teorias quanto normas concordam que a excentricidade da saída causa pressões laterais, sendo estas últimas muito diferentes para as pressões que são produzidas quando a saída é concêntrica, mas elas divergem sobre a distribuição da variação da pressão, bem como seu aumento.

Para a análise de pressões estáticas em silos cilíndricos com tremonhas excêntricas Guaita et al. (2003) consideraram um modelo de silo de 10,5m, altura da tremonha de 2,5m, altura do cilindro de 8m, raio do silo de 3m, transição do limite da largura, com uma malha mais delgada, a fim de reduzir a percentagem da energia do erro articulada de 1m. O raio da saída foi de 0,5m, excentricidade variável de 0 a 100% e ângulos formados pelas geratrizes da tremonha colocada sobre o plano XZ e a horizontal variáveis de acordo com a excentricidade da tremonha.

A simulação foi elaborada segundo o critério elasto-plástico Druker-Prager (Druker & Prager, 1952). A definição do modelo foi feita introduzindo-se os valores de coesão, ângulo de atrito interno e ângulo de dilatação para o produto armazenado sendo que o módulo de elasticidade  $E$  foi de 500 KPa, peso específico  $\gamma$  de 9 kN.m<sup>-3</sup>, coeficiente de atrito entre grão e parede  $\mu$  de 0,25, coesão  $c$  de 0,71 kN.m<sup>-2</sup>, ângulo de dilatação  $\psi$  de 2,5° e ângulo de atrito interno  $\Phi$  22-30°.

Os resultados deste trabalho podem ser analisados nas Figuras 35, 36 e 37.

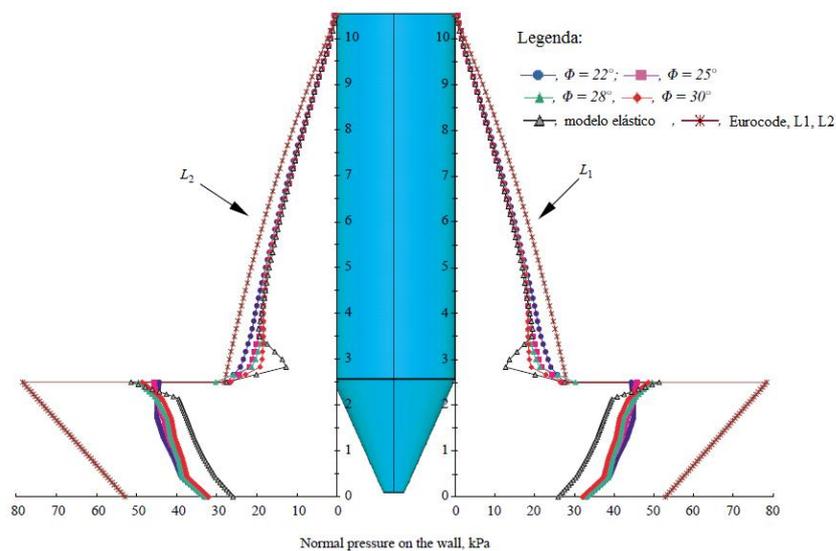


FIGURA 35 Análise das pressões sobre uma tremonha concêntrica variando o ângulo de atrito interno

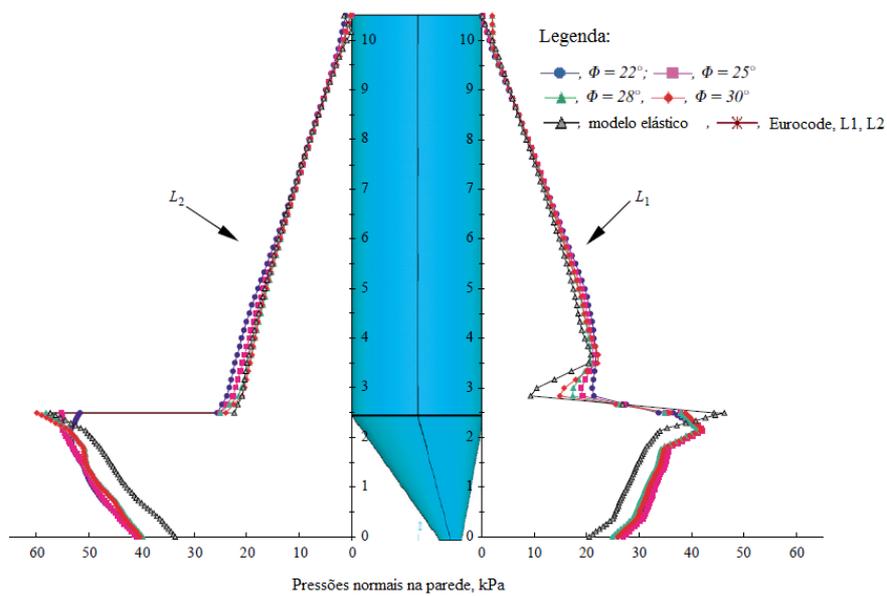


FIGURA 36 Pressões normais na parede variando o ângulo de atrito interno em uma tremonha com 60% de excentricidade.

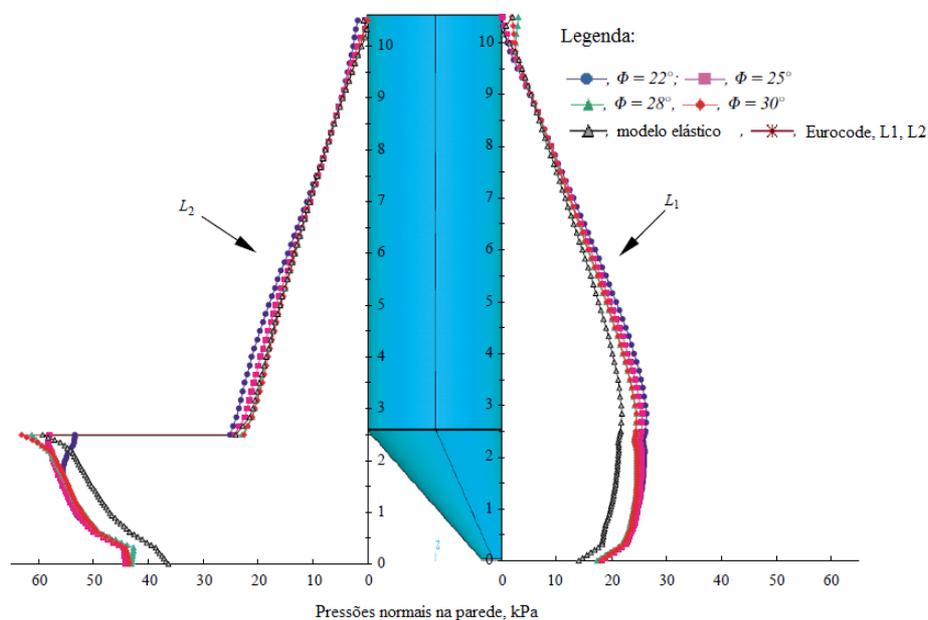


FIGURA 37 Pressões normais na parede variando o ângulo de atrito interno em uma tremonha com 100% de excentricidade.

Como podem ser vistas a partir da análise das figuras, as pressões aumentam no lado oposto à saída do deslocamento (em L2), com o aumento da excentricidade da tremonha. No entanto, dentro da mesma excentricidade, as pressões ao longo da parede do cilindro bem como sobre a parede da tremonha aumentam conforme a diminuição do ângulo de atrito interno.

Próximo a reta de transição da parede com a tremonha apresenta ser uma região de sobrepressões ou um pico de pressão sobre a reta da parede (L1), bem como ao longo da parede com a tremonha inclinada (L2) com 100% de excentricidade da mesma. Isso ocorre porque uma constrição repentina na transição do fluxo resulta em um aumento nas pressões horizontais na saída do material ao longo de toda a largura do silo e, conseqüentemente, em um pico de pressão ao longo da reta da parede. No entanto, o pico de pressão logo abaixo da junção entre a parede e a tremonha inclinada, é maior do que na reta da parede.

Essa diferença entre duas paredes é causada pelo fato de as paredes inclinadas da tremonha receber uma contribuição a partir da tensão na vertical provocada pelo peso do material, bem como forças causadas pela aceleração.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho consiste em aplicar cargas por meio de uma prensa hidráulica a duas tremonhas, sendo uma cônica com 15,17 cm de excentricidade e uma piramidal com 10 cm de excentricidade. As cargas aplicadas em cada uma destas tremonhas visam simular a carga referente a uma massa de produto acima da tremonha (corpo do silo) e, portanto, quanto maiores as cargas aplicadas, maiores serão as quantidades de produto no corpo do silo e maiores serão as relações altura/diâmetro.

Os valores de excentricidade foram definidos de forma que, para a tremonha piramidal, o valor de 10 cm de excentricidade representa uma excentricidade de 33%, sendo que o mínimo valor para que a tremonha seja considerada excêntrica segundo AS 3774:1996 seria de 7 cm. Sendo assim, adotou-se um valor ligeiramente superior (10 cm), enquanto que para a tremonha cônica, a excentricidade de 15,17 cm representou uma percentagem de 55% de excentricidade. Neste caso, o objetivo foi de adotar uma excentricidade comumente encontrada em tremonhas cônicas utilizadas em indústrias de produção de concreto ou indústrias destinadas a fabricação de rações.

Portanto, para a tremonha piramidal buscou-se trabalhar com um valor bem próximo do mínimo valor para se considerar a tremonha como excêntrica. Já na tremonha cônica, objetivou-se trabalhar com um valor de excentricidade que fosse comumente encontrado nas indústrias.

#### 3.1 Produto granular

Adotou-se a areia grossa seca como produto responsável por exercer as pressões nas paredes das tremonhas por ser este um material de fácil aquisição, alto peso específico, da ordem de  $16 \text{ kN.m}^{-3}$ , além de estar referenciado na norma australiana AS 3774:1996 e europeia EN 1991-4:2006.

Segundo a (AS, 1996), para areia grossa seca considera-se um peso específico médio de  $14 \text{ kN.m}^{-3}$  e peso específico superior de  $17 \text{ kN.m}^{-3}$ . Já a EN 1991-4:2006 recomenda que seja adotado  $14 \text{ kN.m}^{-3}$  para o peso específico inferior e  $16 \text{ kN.m}^{-3}$  para o peso específico superior. Nos cálculos foi adotado o valor de  $16 \text{ kN.m}^{-3}$  de forma a satisfazer ambas as normas.

### **3.2 Modelos físicos propostos**

As duas tremonhas construídas para a realização dos ensaios possuem  $70 \text{ cm}$  de lado para a piramidal e  $70 \text{ cm}$  de diâmetro para a cônica. A boca de descarga da piramidal apresenta uma abertura de  $10 \text{ cm}$  de lado e para a cônica adotou-se um diâmetro de  $15 \text{ cm}$ .

A excentricidade adotada para a tremonha piramidal foi de  $10 \text{ cm}$  (33%) e para a cônica  $15,17 \text{ cm}$  (55%). Tais valores estão dentro do que as normas AS 3774:1996 e EN 1991-4:2006 consideram como tremonhas excêntricas, ou seja, para a norma australiana a excentricidade é caracterizada quando o deslocamento da boca da tremonha for 10% do diâmetro (lado) do silo e para a norma europeia 25%.

Nas Figuras 38 e 39, evidenciam-se as dimensões referentes às paredes das tremonhas que contêm a excentricidade.

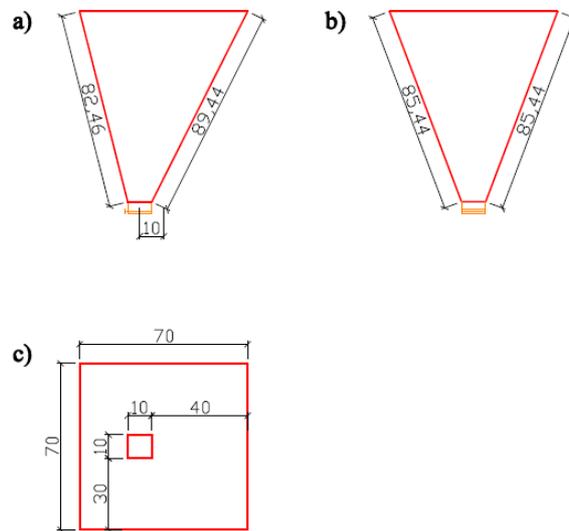


FIGURA 38 Vistas ortogonais da tremonha piramidal. a) vista principal; b) vista lateral; c) vista superior.

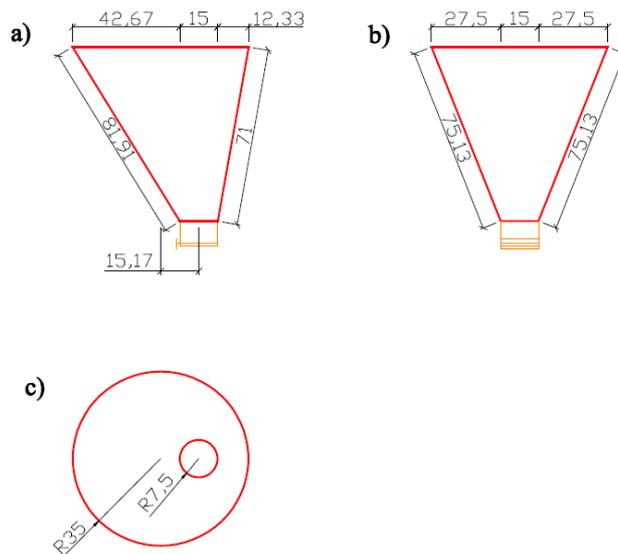


FIGURA 39 Vistas ortogonais da tremonha cônica. a) vista principal; b) vista lateral; c) vista superior.

### 3.3 Construção das tremonhas

As chapas das paredes das tremonhas constituíam-se de chapa zincada (CZC), produto laminado a frio e inteiramente revestido com camada de zinco por processo de imersão a quente, espessura de 26” *pol/MSG* ou 0,50 *mm* e massa de 4,00  $kg.m^{-2}$ . A escolha por este material deve-se ao fato de que havia necessidade de uma chapa que fosse ao mesmo tempo resistente e que pudesse sofrer grandes deformações sem se romper.

As bocas das tremonhas foram confeccionadas com CZC de 18” *pol/MSG* (1,25 *mm*) e massa de 10  $kg.m^{-2}$ . Dessa forma, garantiria-se que a deformação ocorreria nas paredes das tremonhas e não na boca de descarga.

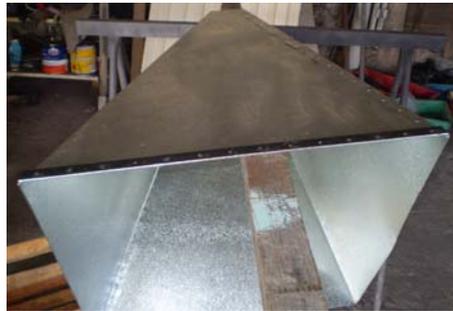
Nas bordas da parte superior das tremonhas, realizou-se um reforço estrutural com barra chata de 1/8” x 1 1/2” (3,17 x 38,10 *mm*) e massa linear de 0,95  $kg.m^{-1}$ .

Considerou-se o módulo de elasticidade (módulo de Young) longitudinal das chapas como o valor de 210 *GPa*, módulo de elasticidade transversal 80 *GPa*, valores estes, muito aceitos e comumente adotados nas literaturas.

Segue abaixo as etapas para confecção das tremonhas sendo elucidados os passos de corte da chapa das paredes, acabamento final da barra chata e introdução da boca de descarga reforçada (Figura 40).



a)



b)



c)



d)

FIGURA 40 Etapas na confecção da tremonha piramidal. a) corte da chapa das paredes; b) acabamento com ferro chato; c) soldagem da tremomha na estrutura; d) detalhe da boca de descarga.

A escolha da chapa zincada de baixa espessura deve-se ao fato desta apresentar elevada deformação quando forem aplicadas cargas (produto granular) em sua superfície, facilitando a conversão de deformações na chapa em pressões normais na parede das tremonhas.

Para a estrutura de sustentação das tremonhas utilizou-se metalon 50 x 30 mm, de perfil retangular, e 22 pol/MSG de espessura do aço. Realizaram-se também contraventamentos na estrutura de forma a aumentar a segurança contra deformações e deslocamentos indesejados e dessa forma, garantir que apenas as

paredes da tremonha se deformassem quando cargas fossem aplicadas (Figura 41).

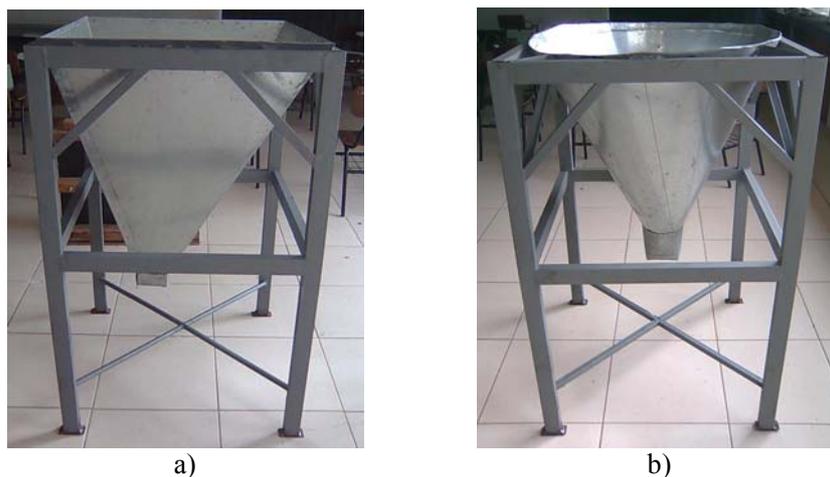


FIGURA 41 Estrutura de sustentação e contraventamentos. a) Estrutura da tremonha piramidal; b) Estrutura da tremonha cônica.

### 3.4 Plataforma para atuação das cargas

De forma a garantir a distribuição uniforme das cargas aplicadas pela prensa na tremonha foram confeccionadas duas plataformas (quadrada e circular) de placas de madeira OSB (*Oriented Strand Board*) e vigas maciças (Figura 42). As placas foram presas as vigas por grampos e cola, sendo que, na parte superior foram utilizadas placas duplas de OSB e na parte inferior placa simples.



a)



b)

FIGURA 42 Plataforma para atuação de cargas. a) Tremonha cônica; b) Tremonha piramidal.

### 3.5 Atuador de cargas

Empregou-se uma prensa hidráulica com capacidade de até 200 kN para aplicar cargas na tremonha simulando diferentes valores de esbeltez do silo (Figura 43).

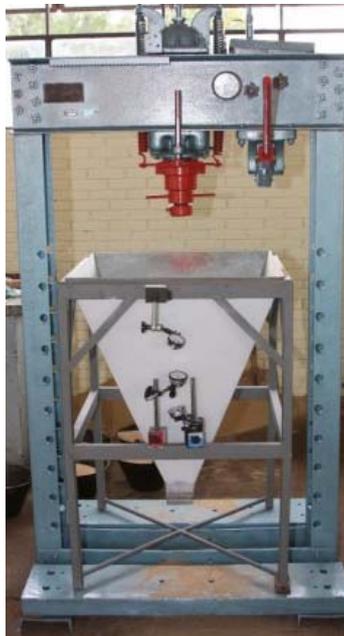


FIGURA 43 Prensa hidráulica para atuação de cargas.

### 3.6 Aquisição de dados

O sistema para aquisição de dados consistiu em módulo de aquisição de 8 canais e 4.8 kHz, uma célula de carga com capacidade de 20  $kN$  e um microcomputador para recepção dos dados do sistema de aquisição (Figura 44).

A célula de carga foi utilizada para dar maior precisão no valor da carga aplicada pela prensa substituindo assim, o manômetro da prensa. O fabricante da célula de carga recomenda que as cargas a serem aplicadas na célula não ultrapassem 70% da capacidade da mesma (14  $kN$ ) para não danificar os *strain gages* internos.



a)



b)

FIGURA 44 Equipamentos para aquisição de dados. a) Módulo para aquisição de dados; b) Célula de carga.

### 3.7 Medida da deformação nas paredes da chapa

A fim de se obter diretamente o valor das deformações ocorridas nas paredes das tremonhas, deformações em  $z$  (normais à parede da tremonha), foram instalados, através de bases magnéticas, relógios comparadores. Tais equipamentos consistem em sensor esférico intercambiável com haste, um mostrador de ponteiro principal e um secundário para a leitura da movimentação da ponta de contato (Figura 45). A precisão deste equipamento é da ordem de  $0,01\text{ mm}$  apresentando uma sensibilidade aceitável para a realização do trabalho.



FIGURA 45 Relógio Comparador.

### 3.8 Métodos de ensaio

A realização dos ensaios se deu no Laboratório de Protótipos (Setor de Máquinas e Mecanização Agrícola) do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras.

A primeira tremonha ensaiada foi a tronco de pirâmide com saída quadrada. Como seqüência de ensaios, primeiramente procedeu-se a instalação dos relógios comparadores na tremonha. Ao todo foram instalados seis relógios sendo três na parede de maior excentricidade e três na parede de menor excentricidade conforme Figura 46.

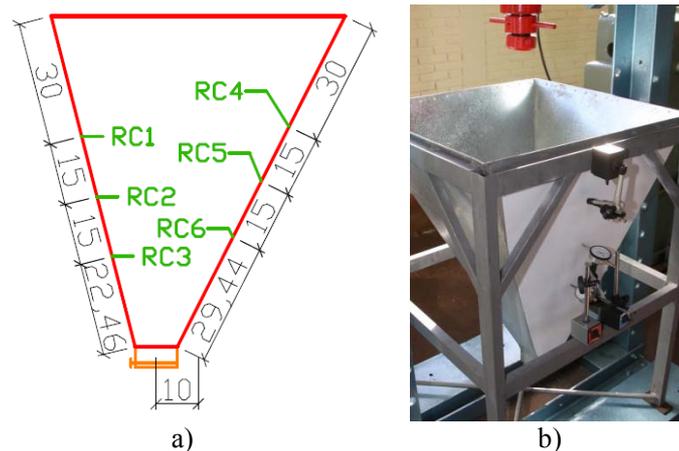


FIGURA 46 Instalação dos relógios comparadores para medição das deformações – tremonha piramidal com saída excêntrica. a) Esquema e cotas dos relógios; b) Instalação dos relógios.

Instalado os relógios procedeu-se a primeira leitura na tremonha sem carga. Após a realização desta leitura, a tremonha foi carregada, inserida a plataforma com a célula de pressão e nova leitura foi realizada. A partir dessa leitura cargas foram sendo aplicadas com a prensa, medidas com a célula de pressão e registrados os valores de leituras dos relógios. As cargas aplicadas

foram até 70% do valor máximo aceitável pela célula para não danificar os *strain gages* da mesma (recomendação do fabricante).

Na tremonha piramidal houve apenas um ensaio, uma vez que os valores de deformação ficaram dentro do esperado. Além disso, o comportamento deste tipo de tremonha é mais fácil de prever se comparado à tremonha cônica. Para esta, realizaram-se dois ensaios, sendo que, a diferença entre estes se deve a posição dos relógios comparadores na tremonha. No primeiro ensaio, os relógios foram colocados da mesma forma que na tremonha piramidal, inclusive obedecendo à disposição dos relógios comparadores, ficando o primeiro a 30 *cm* da borda superior e espaçados em 15 *cm* um do outro. No segundo ensaio, os relógios ficaram em novas posições na tremonha como será tratado no item 3.9.

A fim de comparar os resultados obtidos pelo método experimental com os valores analíticos encontrados pelas normas AS 3774:1996 e EN 1991-4:2006, foi elaborada uma planilha eletrônica para o cálculo das pressões normais segundo as normas citadas (Figura 47).

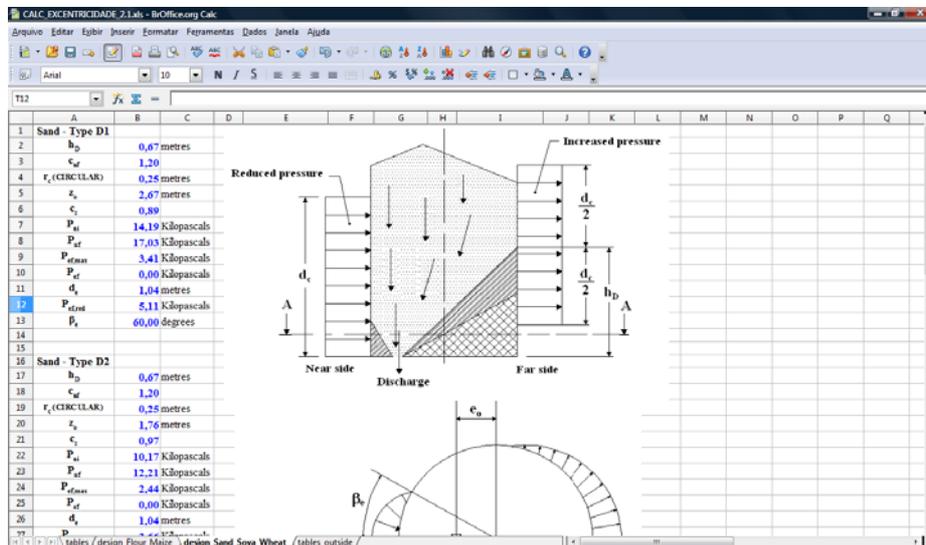


FIGURA 47 Planilha eletrônica para o cálculo das pressões em tremonhas cônicas e piramidais.

Os valores adotados para as propriedades físicas da areia foram os recomendados pelas normas que apresentam tabelas próprias de valores médios, inferiores e superiores das principais propriedades requeridas para o cálculo das pressões (Tabelas 7 e 8).

TABELA 7 Valores das propriedades físicas para areia segundo AS 3774:1996.

Propriedades físicas	Valores		
	Inferior	Médio	Superior
Peso específico ( $\gamma$ ) kN.m <sup>-3</sup>	-	14	17
Efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ) °	30	-	40
Ângulo de atrito entre o produto e a parede ( $\phi_w$ ) ° - Superfície tipo D1	15	-	25
Ângulo de atrito entre o produto e a parede ( $\phi_w$ ) ° - Superfície tipo D2	22	-	28
Ângulo de atrito entre o produto e a parede ( $\phi_w$ ) ° - Superfície tipo D3	25	-	35
Ângulo de repouso ( $\phi_r$ ) °	-	30	-

TABELA 8 Valores das propriedades físicas para areia segundo EN 1991-4:2006.

Propriedades físicas	Valores		
	Inferior	Médio	Superior
Peso específico ( $\gamma$ ) kN.m <sup>-3</sup>	14	-	16
Ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ) °	33	36	39
Coefficiente de atrito entre o produto e a parede ( $\mu$ ) – Superfície tipo D1	0,33	0,38	0,44
Coefficiente de atrito entre o produto e a parede ( $\mu$ ) – Superfície tipo D2	0,41	0,48	0,56
Coefficiente de atrito entre o produto e a parede ( $\mu$ ) – Superfície tipo D3	0,49	0,57	0,66
Ângulo de repouso ( $\phi_r$ ) °	-	39	-

### 3.9 Ensaio especial

Com o intuito de determinar o processo de ovalização em tremonhas cônicas, descrito por diversos autores, procedeu-se a execução de um ensaio que foi denominado de “ensaio especial”. Neste ensaio, alterou-se a configuração dos relógios comparadores de forma que os dois relógios colocados próximos a

boca de descarga em ambos os lados foram retirados e instalados nas paredes perpendiculares às paredes de excentricidade, tal como mostrado na Figura 48.

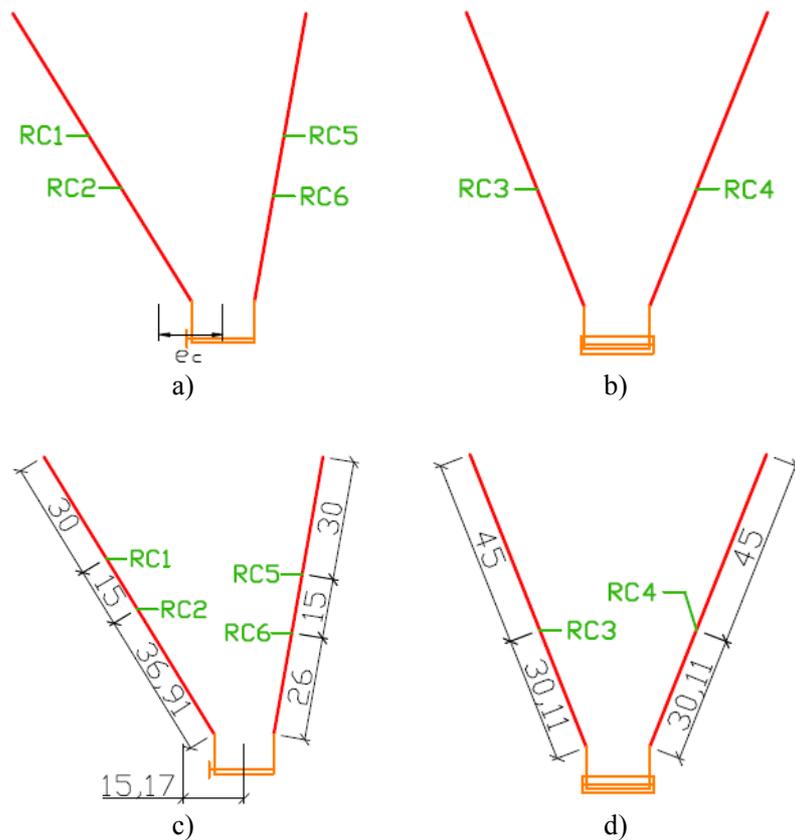


FIGURA 48 Esquemas e cotas dos RC's para o ensaio especial na tremonha cônica. a) Esquema dos RC's nas paredes de excentricidade; b) Esquema dos RC's nas paredes perpendiculares à excentricidade; c) Cotas dos RC's nas paredes de excentricidade; d) Cotas dos RC's nas paredes perpendiculares à excentricidade.

### 3.10 Transformação das deformações em pressões

Na transformação das deformações em pressões deve-se, primeiramente, verificar qual o melhor método para a situação existente. Se a parede da

tremonha for considerada como uma viga bi-apoiada, então pode-se utilizar o método proposto por Calil Junior (1984). Caso se deseje trabalhar com deformações em toda a chapa da parede da tremonha, então deve-se trabalhar com o método proposto por Araújo (1997). Neste trabalho, optou-se por considerar a deformação na parede como a deformação na linha dos relógios comparadores (linha central na parede da tremonha) e, portanto, utilizando o método proposto por Calil Junior (1984). A seguir, são apresentados os métodos citados para a determinação das pressões nas paredes da tremonha.

#### 1º Método: Citado por Calil Junior (1984)

Para a conversão das deformações em pressões (Calil Junior, 1984) sugere o seguinte equacionamento:

1 – Momento de inércia da seção considerada

$$I = \frac{b.h^3}{12} \quad (66)$$

sendo:

$I$  = Momento de Inércia ( $m^4$ );

$b$  = largura da seção retangular (m);

$h$  = altura da seção retangular (m).

Para o ensaio proposto, a seção relativa ao momento de inércia diz respeito à seção onde a ponta do relógio atingiu a chapa. Para tal, considera-se a seção de 1 x 0,5 mm (comp. x espessura da chapa). Assim sendo:

$$I = \frac{1.(0,5)^3}{12} = 0,010416666 \text{ mm}^4$$

2 – Determinação de  $y$  (linha neutra)

$$y = 0,250 \text{ mm}$$

3 – Momento fletor devido a uma carga distribuída ( $p$ ) sobre a placa

$$M = \frac{p.l^2}{8} \quad (67)$$

Sendo  $l$  referente ao comprimento da viga hipotética, ou seja, referente as distâncias entre os relógios comparadores (30, 45 e 60 cm na tremonha), portanto,  $l = 30 \text{ cm}$ . Portanto,

$$M = \frac{p.(300)^2}{8} = 11250p \text{ kgf.mm}$$

4 – Tensão de flexão ( $\sigma_f$ )

$$\sigma_f = E.\varepsilon = \frac{M.y}{I} \quad (68)$$

Sendo:

$$E = 21000 \text{ kgf.mm}^{-2} = 210 \text{ GPa}$$

Então:

$$21000\varepsilon = \frac{11250p.0,250}{0,010416666}$$

Trabalhando as unidades de forma a obter o resultado em kPa:

$$p = 7777,77728.\varepsilon \text{ kPa} \quad (69)$$

Neste método, considera-se a linha onde foram instalados os relógios comparadores como uma viga bi-apoiada e o produto exercendo uma carga distribuída nesta viga.

#### 2º Método: Citado por Araújo (1997)

Segundo Araújo (1997), as teorias normais sobre flexão de placas elásticas mostram que as tensões de flexão -- quando os deslocamentos na placa são maiores que a espessura da mesma -- são praticamente desprezadas em relação às tensões de membrana. Neste caso, a teoria dos grandes deslocamentos (TGD) com  $\lambda > 3$  pode ser utilizada para a determinação de tais tensões. Para tal, considera-se o  $\lambda$  como a relação  $a/b$  nas placas retangulares, onde  $a$  é o menor comprimento lateral da placa e  $b$  o maior comprimento.

A TGD mostra que as placas com bordas bi-articuladas apresentam maior eficiência estrutural frente às placas com bordas bi-engastadas. Tal fato deve-se aos engastamentos provocarem uma diminuição da força de membrana e seu conseqüente efeito na diminuição dos momentos de flexão (Timoshenko, 1940); (Troistisky, 1968); (Feodosiev, 1988) citado por (Araújo, 1997).

Considerando uma placa longa, fina, retangular e com bordas bi-articuladas, sujeita a uma carga uniformemente distribuída  $p_{NT}$  sobre uma faixa de largura unitária poder-se-á, para efeitos práticos, considerar a placa como uma viga de comprimento  $L$  e seção transversal retangular de altura  $t$  (Araújo, 1997). Tal situação pode ser visualizada na Figura 49.

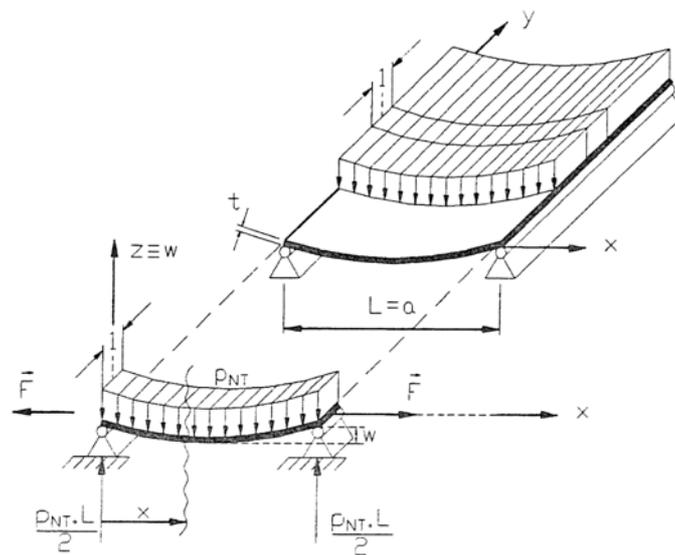


FIGURA 49 Placa retangular bi-articulada com  $\lambda > 3$ .

Fonte: Araújo (1997).

Para o cálculo das pressões nas paredes da tremonha, deve-se trabalhar com a teoria dos grandes deslocamentos (TGD) com tensões de membrana, uma vez que para tal teoria os deslocamentos devem ultrapassar a ordem de grandeza da espessura da placa (chapa). Nesse caso, espera-se a ocorrência de grandes deslocamentos na chapa e um comportamento de efeito membrana com  $\lambda > 3$  devido ao fato de as chapas das tremonhas serem pouco espessas,.

Assim sendo, as deformações predominantes são apenas em uma direção e as expressões utilizadas para os cálculos do momento fletor e das tensões são:

$$M = \frac{t^3 E \varepsilon}{12} \quad (70)$$

$$\sigma = E \varepsilon \quad (71)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Resultados dos ensaios na tremonha piramidal

A Tabela 9 apresenta os valores de cargas aplicadas à tremonha piramidal e as respectivas deformações obtidas pelos relógios comparadores nas paredes da tremonha.

TABELA 9 Cargas e deformações obtidas na tremonha piramidal.

Carga	Carga (kN)	Deformação (mm)					
		RC1	RC2	RC3	RC4	RC5	RC6
		Altura na tremonha (cm)					
		30	45	60	30	45	60
Vazia		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Plataforma		2,411	2,512	2,669	3,188	4,760	6,625
1	0,074	0,544	0,799	0,400	0,682	1,848	0,862
2	0,826	0,680	0,460	0,750	1,158	0,362	1,318
3	1,896	0,725	0,798	0,770	1,032	2,230	1,170
4	3,000	0,535	0,712	0,700	0,890	1,317	1,091
5	4,505	0,671	0,830	0,830	0,955	1,366	1,269
6	6,034	0,549	0,660	0,650	0,947	1,152	1,090
7	8,385	0,380	0,949	0,890	1,175	1,470	1,420
8	10,089	0,972	0,571	0,540	0,620	1,760	0,750
9	11,183	0,428	1,550	0,490	0,460	1,260	1,650
10	13,346	0,730	0,740	1,690	0,640	0,890	-0,180*

\* Valores negativos representam reduções de pressão ou deformações laterais na tremonha (ovalização).

Primeiramente, foram medidos os valores de deformação com a tremonha vazia, ou seja, neste caso, não existiram deformações. Logo após, a tremonha foi completamente carregada com areia, foi inserido a plataforma de atuação de cargas sobre a areia e procederam-se as leituras das deformações. A partir desse ponto, valores de cargas foram aplicados no intuito de simular diferentes massas de produto acima da tremonha, ou seja, diferentes alturas de

corpo do silo e dessa forma, diferentes relações altura/diâmetro. A aplicação das cargas foi até próximo do valor máximo permitido pelo fabricante da célula de carga que é de 70% da capacidade da célula, ou seja, até próximo de 14 kN (70% de 20 kN).

Os valores de cargas aplicadas sobre o produto granular (areia) permitiram simular uma relação altura/lado de até 2,43 caracterizando dessa forma, silos esbeltos de acordo com a EN 1991-4:2006 e medianamente esbeltos de acordo com a AS 3774:1996.

A partir da análise da Tabela 9, observou-se que a tremonha piramidal possui baixa rigidez na sua parede uma vez que a mesma apresentou, em geral, elevados valores de deformação das chapas.

A Figura 50 a, b e c apresenta os gráficos com as deformações obtidas em função da posição dos relógios comparadores.

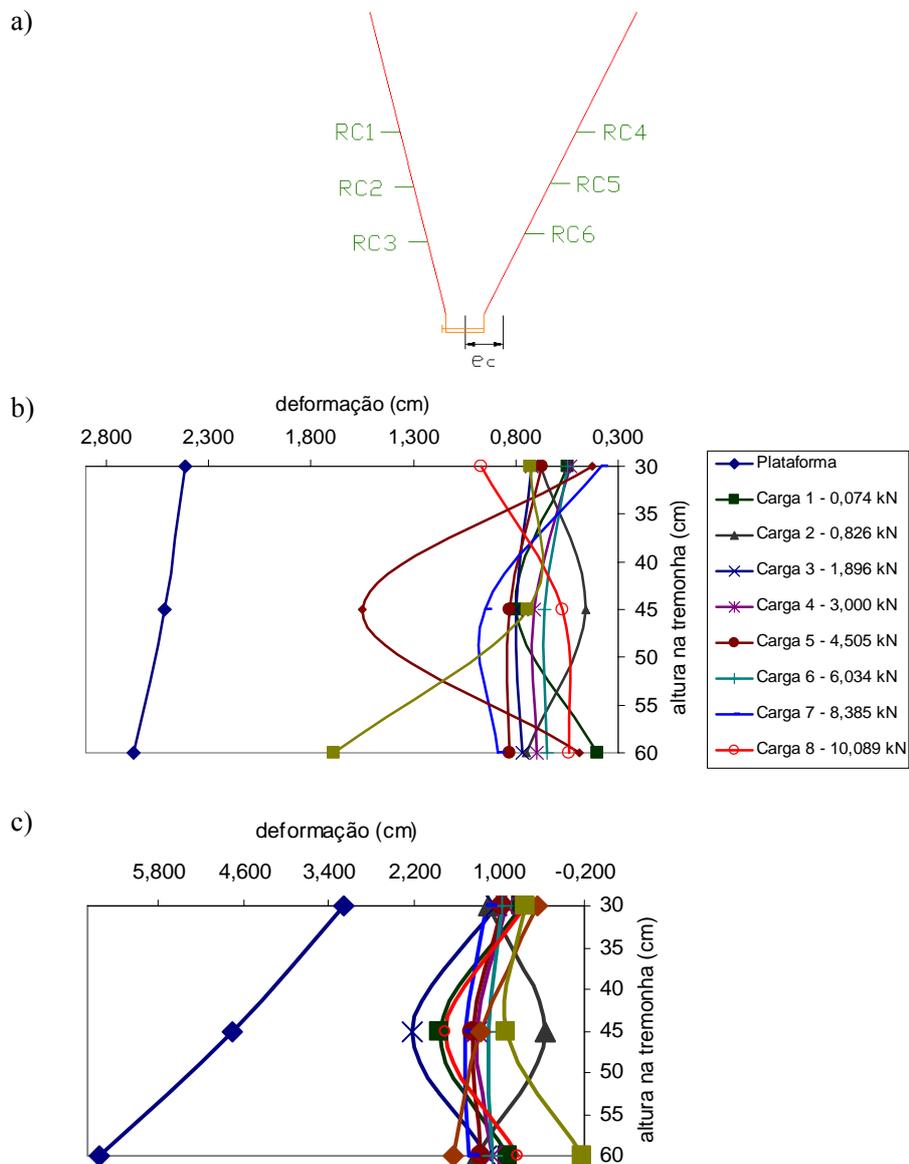


FIGURA 50 Deformações nas paredes da tremonha. a) Esquema de fixação dos relógios comparadores; b) Deformações na parede de menor excentricidade - RC1, RC2 e RC3; c) Deformações na parede de maior excentricidade - RC4, RC5 e RC6.

Observou-se uma grande variabilidade nas deformações de acordo com a carga aplicada demonstrando a dificuldade existente na previsão das deformações em paredes de tremonhas.

A Tabela 10 apresenta os valores de deformações absolutas (totais) nas paredes da tremonha.

TABELA 10 Deformações absolutas nas paredes da tremonha piramidal.

Carga (kN)	Deformação Total (mm)					
	RC1	RC2	RC3	RC4	RC5	RC6
	Altura na tremonha (cm)					
	30	45	60	30	45	60
Plataforma	2,411	2,512	2,669	3,188	4,760	6,625
0,074	2,955	3,311	3,069	3,870	6,608	7,487
0,826	3,635	3,771	3,819	5,028	6,970	8,805
1,896	4,360	4,569	4,589	6,060	9,200	9,975
3,000	4,895	5,281	5,289	6,950	10,517	11,066
4,505	5,566	6,111	6,119	7,905	11,883	12,335
6,034	6,115	6,771	6,769	8,852	13,035	13,425
8,385	6,495	7,720	7,659	10,027	14,505	14,845
10,089	7,467	8,291	8,199	10,647	16,265	15,595
11,183	7,895	9,841	8,689	11,107	17,525	17,245
13,346	8,625	10,581	10,379	11,747	18,415	17,065

Observou-se que o lado de menor excentricidade apresentou também menores deformações como era esperado. Em média, as deformações no lado de maior excentricidade representaram uma parcela de 61,5% das pressões totais, ou seja, de 100% do valor de uma determinada pressão, 61,5% concentrou no lado de maior excentricidade e 38,5% no lado de menor excentricidade. Assim, é importante notar que os resultados estão em acordo com as normas analisadas uma vez que estas recomendam que seja considerada uma redução de pressões no lado de menor excentricidade e incremento de pressões no lado de maior excentricidade.

As Tabelas 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18 apresentam os valores das pressões obtidas segundo as normas AS 3774:1996, EN 1991-4:2006 pelos dois métodos propostos por esta e os valores de deformações obtidos em ensaio e convertidos em pressões.

TABELA 11 Pressões obtidas segundo AS 3774:1996 para a situação de ensaio. Lado de maior excentricidade.

<b>Altura na tremonha / RC</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=1,099</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,0377</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,43</b>
30 cm / 4	6,06	7,69	8,17
45 cm / 5	7,49	9,11	9,59
60 cm / 6	8,91	10,54	11,02

TABELA 12 Pressões obtidas segundo AS 3774:1996 para a situação de ensaio. Lado de menor excentricidade.

<b>Altura na tremonha / RC</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=1,099</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,0377</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,43</b>
30 cm / 1	4,34	5,01	5,15
45 cm / 2	5,47	6,14	6,28
60 cm / 3	6,60	7,27	7,42

TABELA 13 Pressões obtidas segundo EN 1991-4:2006 para a situação de ensaio. Lado de maior excentricidade.

<b>Altura na tremonha / RC</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=1,099</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,0377</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,43</b>
30 cm / 4	8,05	9,12	9,35
45 cm / 5	9,51	11,13	11,48
60 cm / 6	10,23	12,40	12,88

TABELA 14 Pressões obtidas segundo EN 1991-4:2006 para a situação de ensaio. Lado de menor excentricidade.

<b>Altura na tremonha / RC</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=1,099</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,0377</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,43</b>
30 cm / 1	3,75	4,13	4,21
45 cm / 2	5,54	6,43	6,62
60 cm / 3	7,27	8,89	9,25

TABELA 15 Pressões obtidas segundo EN 1991-4:2006, utilizando o método 2, para a situação de ensaio. Lado de maior excentricidade.

<b>Altura na tremonha / RC</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=1,099</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,0377</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,43</b>
30 cm / 4	11,15	13,05	13,47
45 cm / 5	12,61	14,99	15,51
60 cm / 6	14,07	16,93	17,55

TABELA 16 Pressões obtidas segundo EN 1991-4:2006, utilizando o método 2, para a situação de ensaio. Lado de menor excentricidade.

<b>Altura na tremonha / RC</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=1,099</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,0377</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,43</b>
30 cm / 1	10,86	12,35	12,68
45 cm / 2	12,74	14,85	15,30
60 cm / 3	14,62	17,34	17,93

TABELA 17 Pressões obtidas em ensaio (conversão das deformações em pressões). Lado de maior excentricidade.

<b>Altura na tremonha / RC</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=1,099</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,0377</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,43</b>
30 cm / 4	6,88	8,64	9,14
45 cm / 5	10,14	13,63	14,32
60 cm / 6	10,44	13,41	13,27

TABELA 18 Pressões obtidas em ensaio (conversão das deformações em pressões). Lado de menor excentricidade.

<b>Altura na tremonha / RC</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=1,099</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,0377</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,43</b>
30 cm / 1	4,76	6,14	6,71
45 cm / 2	5,27	7,65	8,23
60 cm / 3	5,26	6,76	8,07

As Figuras 51a e b, 52a e b e 53a e b apresentam os gráficos relacionados aos valores de pressão apresentados anteriormente levando-se em consideração as relações altura / diâmetro (H/D) de 1,10, 2,04 e 2,43. Tais gráficos apresentaram, para cada relação H/D, os valores de pressões observados conforme a metodologia da AS 3774:1996, os dois métodos propostos pela EN 1991-4:2006 e os resultados de ensaio para o lado de maior excentricidade e o de menor excentricidade.

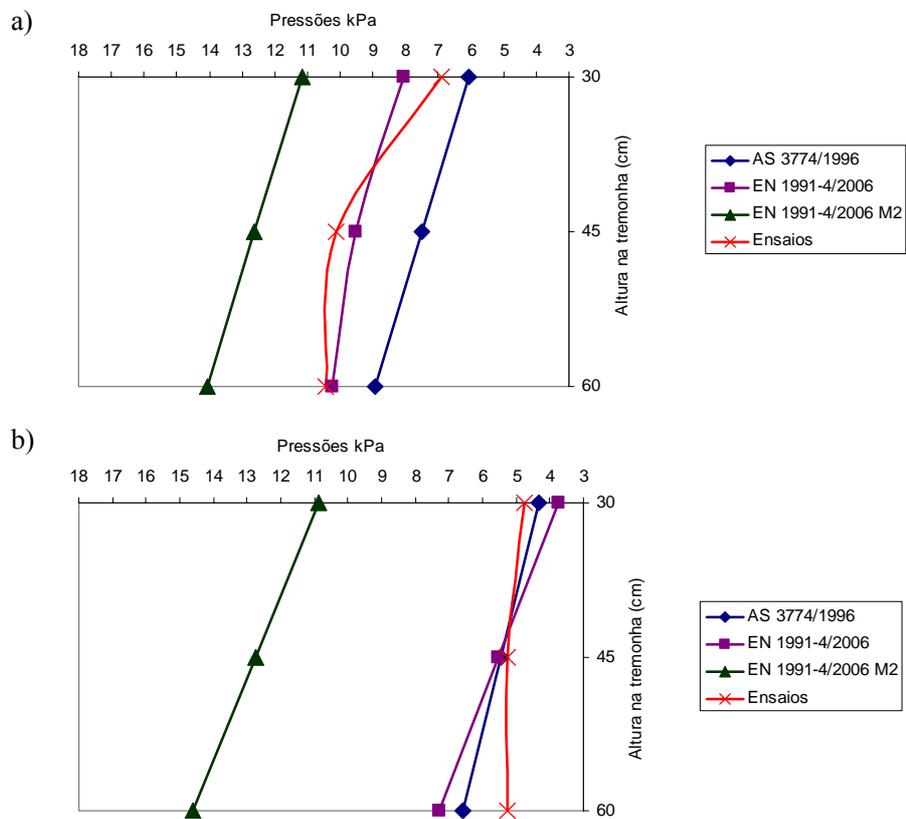


FIGURA 51 a) Comparação das pressões para o lado de maior excentricidade e  $H/D = 1,10$ ; b) Comparação das pressões para o lado de menor excentricidade e  $H/D = 1,10$ .

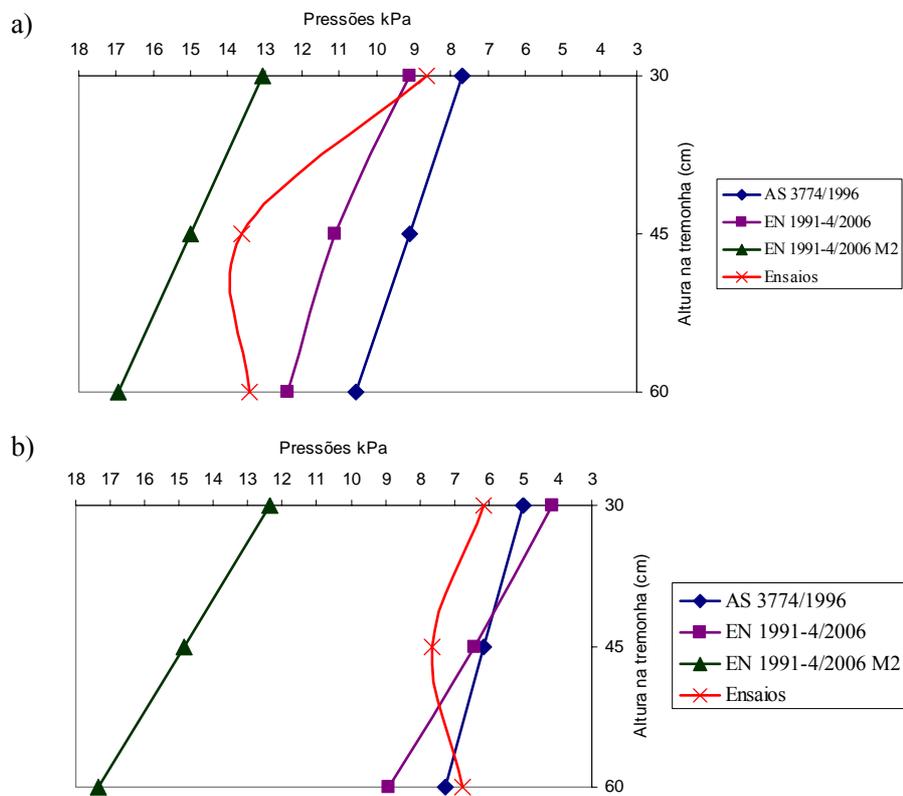


FIGURA 52 a) Comparação das pressões para o lado de maior excentricidade e  $H/D = 2,04$ ; b) Comparação das pressões para o lado de menor excentricidade e  $H/D = 2,04$ .

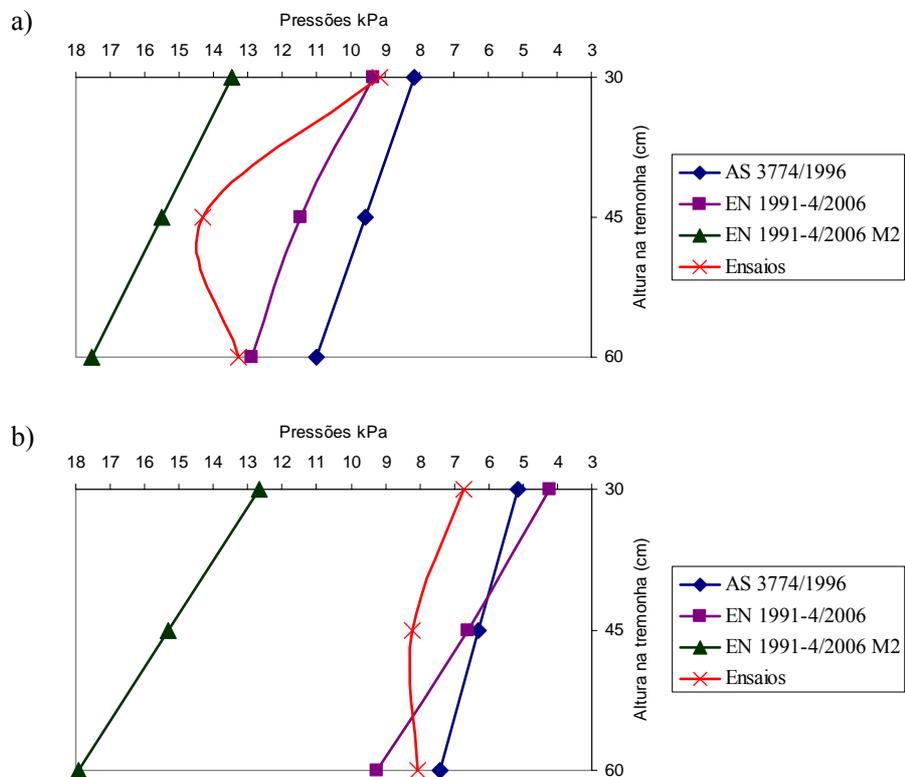


FIGURA 53 a) Comparação das pressões para o lado de maior excentricidade e  $H/D = 2,43$ ; b) Comparação entre as pressões para o lado de menor excentricidade e  $H/D = 2,43$ .

Avaliando as pressões na tremonha piramidal observou-se que os valores obtidos através de ensaios, em geral, foram ligeiramente superiores àqueles obtidos através das normas AS 3774:1996 e EN 1991-4:2006. Apenas o método 2 da EN 1991-4:2006 obteve valores superiores aos valores registrados no ensaio. Tal fato ocorreu devido a vários fatores, em primeiro lugar, ambas as normas avaliadas sugerem equacionamentos para tremonhas cônicas sendo que tais cálculos também foram aplicados a tremonhas piramidais revelando serem de baixa precisão na determinação das pressões atuantes nestas tremonhas. Em

segundo lugar, observou-se que a norma européia EN 1991-4:2006 não trata de pressões em tremonhas excêntricas e sim em paredes de silos com descarga excêntrica, portanto, a metodologia utilizada, tanto no primeiro método de cálculo como no método 2, são aplicadas a tremonhas concêntricas. Apesar disso, esta norma, em geral, foi a que obteve os valores mais próximos dos ocorridos no ensaio.

O método 2 obteve resultados muito acima dos que ocorreram de fato demonstrando ser um método bastante conservador. Este método foi utilizado durante muito tempo como o principal método para a determinação das pressões na tremonha segundo a EN 1991-4, entretanto, com a revisão desta norma em 2006 este método passa a ser um anexo da mesma podendo ainda ser utilizado caso o projetista opte pelo mesmo. Como os outros dois métodos (método 1 da EN 1991-4:2006 e AS 3774:1996) geraram resultados menos satisfatórios, uma vez que subestimaram as pressões que ocorreram experimentalmente, recomenda-se a adoção do método 2 da EN 1991-4:2006 para o cálculo de pressões em tremonhas piramidais excêntricas. Este método encontra-se no anexo G da referida norma.

#### **4.2 Resultados dos ensaios na tremonha cônica**

Na Tabela 19 são apresentados os valores de deformações nas paredes da tremonha cônica em função das cargas aplicadas.

TABELA 19 Cargas e deformações obtidas na tremonha cônica.

Carga	Carga (kN)	Deformação (mm)					
		RC1	RC2	RC3	RC4	RC5	RC6
		Altura na tremonha (cm)					
		30	45	60	30	45	60
Vazia		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Plataforma		-0,071	0,125	0,130	-0,120	-0,020	-0,050
1	2,966	-0,125	0,333	0,310	0,800	0,025	0,000
2	7,374	-0,090	0,277	0,270	-0,170	-0,005	0,010
3	8,409	-0,050	0,120	0,120	-1,100	-0,010	-0,015
4	10,348	-0,050	0,140	0,120	-0,090	-0,020	-0,005
5	11,371	-0,040	0,070	0,070	0,000	0,000	0,000
6	12,723	-0,060	0,100	0,080	-0,150	-0,030	0,010
7	13,334	0,030	0,020	0,020	-0,010	-0,005	0,000
8	15,051	-0,080	0,105	0,095	-0,090	-0,005	0,020

\* Valores negativos representam reduções de pressão ou deformações laterais na tremonha (ovalização).

Com os valores de cargas aplicados foi possível simular uma relação altura/diâmetro de 3,50 sendo superior ao valor encontrado no ensaio da tremonha piramidal. Na tremonha cônica pôde-se trabalhar com relações H/D maiores que na piramidal devido ao fato da geometria da tremonha cônica fazer com que esta possuísse maior resistência aos esforços de flexo-tração e compressão nas chapas, além disso, a tremonha cônica possuía um volume menor que a tremonha piramidal, ou seja, com valores idênticos de carga aplicada, a tremonha cônica apresentava maiores relações H/D. Na classificação do silo simulado segundo as normas EN 1991-4: 2006 e AS 3774:1996 este é classificado em silo esbelto por ambas as normas uma vez que a norma europeia classifica como silos esbeltos aqueles com H/D maior ou igual a 2,0 e para norma australiana silos esbeltos são aqueles com relação altura/diâmetro (lado) maior que 3,0.

A Figura 54 a, b e c apresenta as deformações na chapa para a tremonha cônica em função da posição dos relógios comparadores.

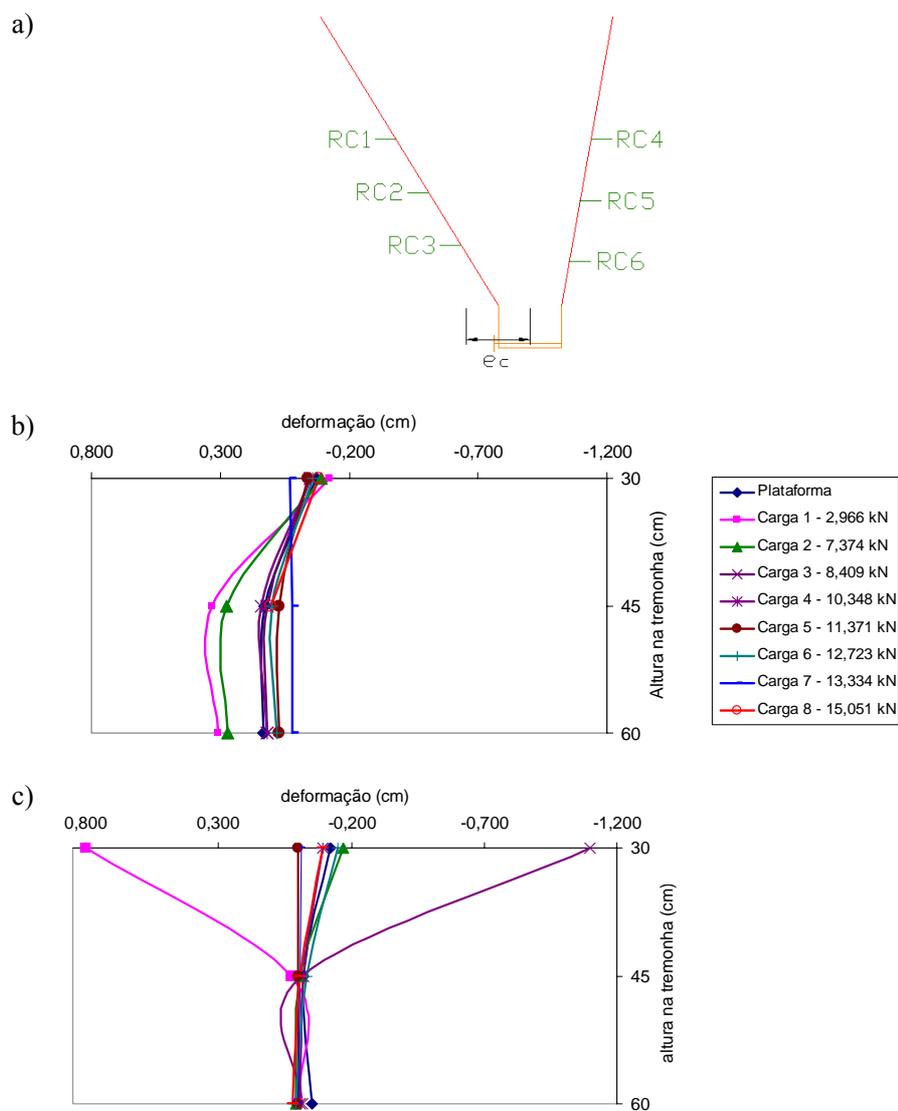


FIGURA 54 Deformações nas paredes da tremonha cônica. a) Posição dos relógios comparadores; b) deformações na parede de maior excentricidade; c) deformações na parede de menor excentricidade.

No ensaio da tremonha cônica observou-se que em média houve uma concentração de 65,76% das deformações na parede de maior excentricidade enquanto que no lado de menor excentricidade verificou-se uma redução (contração) de 34,24% nas deformações da parede.

Na Tabela 20 são apresentados os valores de deformações totais obtidos no ensaio da tremonha cônica em função das diversas cargas aplicadas.

TABELA 20 Deformações absolutas na tremonha cônica em função das cargas aplicadas.

Carga (kN)	Deformação Total (mm)					
	RC1	RC2	RC3	RC4	RC5	RC6
	Altura na tremonha (cm)					
	30	45	60	30	45	60
Plataforma	-0,071	0,125	0,130	-0,120	-0,020	-0,050
2,966	-0,196	0,458	0,440	0,680	0,005	-0,050
7,374	-0,286	0,735	0,710	0,510	0,000	-0,040
8,409	-0,336	0,855	0,830	-0,590	-0,010	-0,055
10,348	-0,386	0,995	0,950	-0,680	-0,030	-0,060
11,371	-0,426	1,065	1,020	-0,680	-0,030	-0,060
12,723	-0,486	1,165	1,100	-0,830	-0,060	-0,050
13,334	-0,456	1,185	1,120	-0,840	-0,065	-0,050
15,051	-0,536	1,290	1,215	-0,930	-0,070	-0,030

\* Valores negativos representam reduções de pressão ou deformações laterais na tremonha (ovalização).

Para a verificação do fenômeno de ovalização constatado apenas na tremonha cônica, uma vez que a tremonha piramidal apresentou deformações positivas em ambos os lados, foi realizado um novo ensaio com o layout descrito na Figura 55 de forma que os RC's 2, 3, 4 e 6 ficaram a 45 cm da borda superior da tremonha (região de transição).

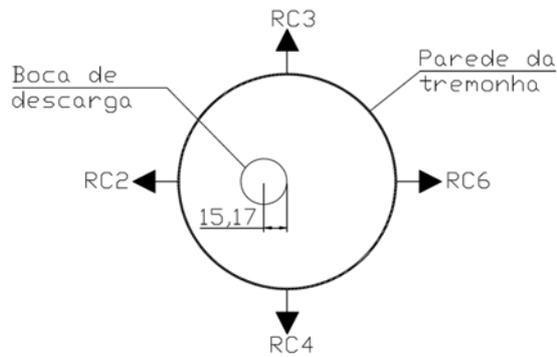


FIGURA 55 *Layout* de distribuição dos Relógios Comparadores na tremonha cônica para o ensaio especial.

A partir deste *layout* proposto, determinou-se as deformações ocorridas nas chapas da tremonha durante o ensaio. A Tabela 21 apresenta estas deformações.

TABELA 21 Deformações totais obtidas durante o ensaio especial.

Carga (kN)	Deformação Total (mm)					
	RC1	RC2	RC3	RC4	RC5	RC6
	Altura (cm)					
	30	45	45	45	30	45
Plataforma	0,000	0,000	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,000	0,000
6,775	0,000	0,340	<u>0,070</u>	<u>0,015</u>	-0,192	0,000
9,690	0,000	0,490	<u>0,130</u>	<u>0,025</u>	-0,312	-0,030
14,310	0,000	0,720	<u>0,200</u>	<u>0,045</u>	-0,502	-0,080
15,650	-0,312	0,830	<u>0,240</u>	<u>0,065</u>	-0,562	-0,110
18,237	-0,342	0,930	<u>0,280</u>	<u>0,077</u>	-0,672	-0,120

A partir da análise desta tabela, constatou-se uma tendência a ovalização da tremonha cônica quando submetida a carregamentos uma vez que a leitura dos RC's 3 e 4 (valores sublinhados na Tabela 21) apresentou valores de deformações positivos tal como esperado.

Na altura de 45 cm abaixo da superfície superior da tremonha (zona de transição), Figura 48, correspondente aos RC's 2, 3, 4 e 6, foi observada uma configuração das deformações tal como mostrado na Figura 56.

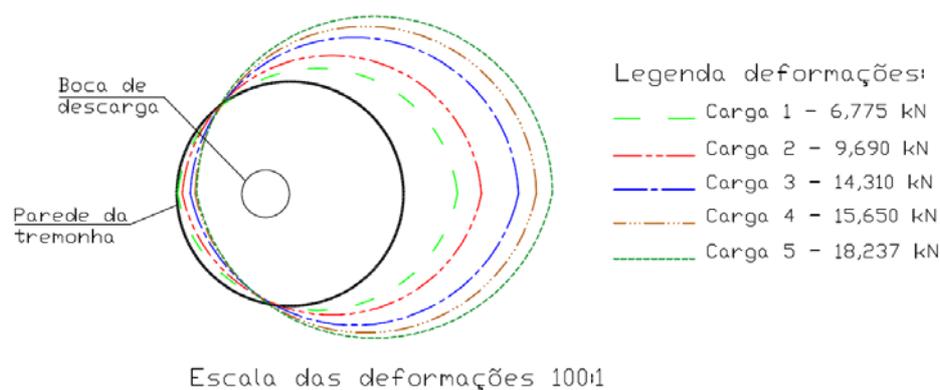


FIGURA 56 Configuração das pressões na tremonha cônica durante o ensaio especial.

Outro fato relevante deve-se às deformações nas paredes da tremonha cônica quando a mesma estava vazia e após o enchimento e inserção da plataforma de atuação de cargas, uma vez que tais deformações foram bem menores se comparados aos valores de deformações na tremonha piramidal quando submetida a este mesmo procedimento de ensaio. Nesse caso, comparada à tremonha piramidal e aliado aos pequenos valores de deformações absolutas apresentadas pela tremonha cônica quando carregamentos foram aplicados, ficou demonstrado que tremonhas cônicas são mais resistentes a deformações em suas paredes devido à forma geométrica que contribui para que ocorra o efeito membrana, ao invés de flexo-trações.

Nas tabelas 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 e 29, são apresentados os valores de pressões nas paredes da tremonha obtidos segundo as normas AS 3774:1996, EN 1991-4:2006, pelos seus dois métodos propostos e os valores de

deformações obtidos em ensaio e transformados em pressões na parede da tremonha. Todas as pressões foram obtidas para o lado de maior e menor excentricidade.

TABELA 22 Pressões obtidas segundo AS 3774:1996 para a situação de ensaio. Lado de maior excentricidade.

<b>Altura na tremonha / RC</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=1,78</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,40</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=3,49</b>
30 cm / 1	6,31	6,73	7,03
45 cm / 2	7,77	8,19	8,49
60 cm / 3	9,23	9,65	9,95

TABELA 23 Pressões obtidas segundo AS 3774:1996 para a situação de ensaio. Lado de menor excentricidade.

<b>Altura na tremonha / RC</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=1,78</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,40</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=3,49</b>
30 cm / 4	4,06	4,32	4,50
45 cm / 5	5,01	5,27	5,45
60 cm / 6	5,96	6,22	6,40

TABELA 24 Pressões obtidas segundo EN 1991-4:2006 para a situação de ensaio. Lado de maior excentricidade.

<b>Altura na tremonha / RC</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=1,78</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,40</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=3,49</b>
30 cm / 1	7,96	9,34	9,71
45 cm / 2	8,70	10,67	11,19
60 cm / 3	8,66	11,19	11,86

TABELA 25 Pressões obtidas segundo EN 1991-4:2006 para a situação de ensaio. Lado de menor excentricidade.

<b>Altura na tremonha / RC</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=1,78</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,40</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=3,49</b>
30 cm / 4	2,28	2,52	2,59
45 cm / 5	3,73	4,53	4,74
60 cm / 6	5,53	7,42	7,92

TABELA 26 Pressões obtidas segundo EN 1991-4:2006, método 2, para a situação de ensaio. Lado de maior excentricidade.

<b>Altura na tremonha / RC</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=1,78</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,40</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=3,49</b>
30 cm / 1	10,75	12,94	13,53
45 cm / 2	11,86	14,53	15,24
60 cm / 3	12,96	16,12	16,96

TABELA 27 Pressões obtidas segundo EN 1991-4:2006, método 2, para a situação de ensaio. Lado de menor excentricidade.

<b>Altura na tremonha / RC</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=1,78</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,40</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=3,49</b>
30 cm / 4	10,24	11,85	12,28
45 cm / 5	11,93	14,27	14,89
60 cm / 6	13,61	16,68	17,50

TABELA 28 Pressões obtidas em ensaio. (Conversão das deformações em pressões). Lado de maior excentricidade.

<b>Altura na tremonha / RC</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=1,78</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,40</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=3,49</b>
30 cm / 1	-2,22	-3,00	-4,17
45 cm / 2	5,72	7,74	10,03
60 cm / 3	5,52	7,39	9,45

TABELA 29 Pressões obtidas em ensaio. (Conversão das deformações em pressões). Lado de menor excentricidade.

<b>Altura na tremonha / RC</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=1,78</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=2,40</b>	<b>Pressão (kPa) H/D=3,49</b>
30 cm / 4	3,97	-5,29	-7,23
45 cm / 5	0,00	-0,23	-0,54
60 cm / 6	-0,31	-0,47	-0,23

Nas Figuras 57a e b, 58a e b e 59a e b são plotados os valores de pressões apresentados anteriormente comparando-os de forma a obter o melhor método para o cálculo de pressões em tremonhas cônicas excêntricas, baseado nas três propostas de equacionamento, sendo uma da AS 3774:1996 e duas propostas pela EN 1991-4:2006. Os cálculos foram realizados para ambos os lados da excentricidade e para três relações altura/diâmetro, 1,78, 2,4 e 3,49.

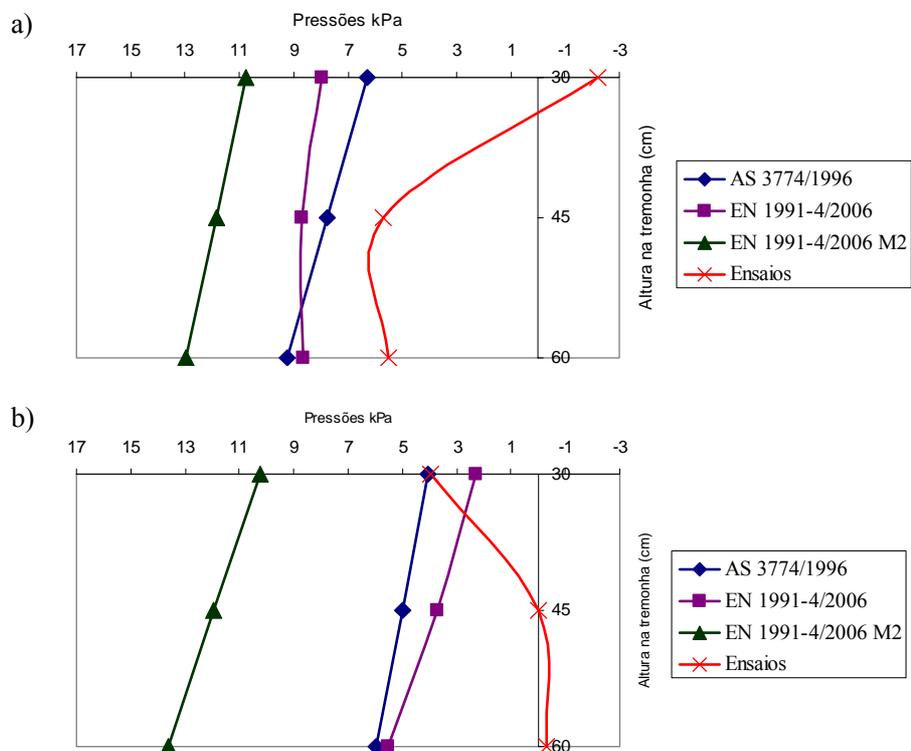


FIGURA 57 Resultados obtidos pela comparação dos diferentes métodos avaliados para relação  $H/D=1,78$  em ambos os lados da tremonha cônica. a) Comparação das pressões para o lado de maior excentricidade; b) Comparação das pressões para o lado de menor excentricidade.

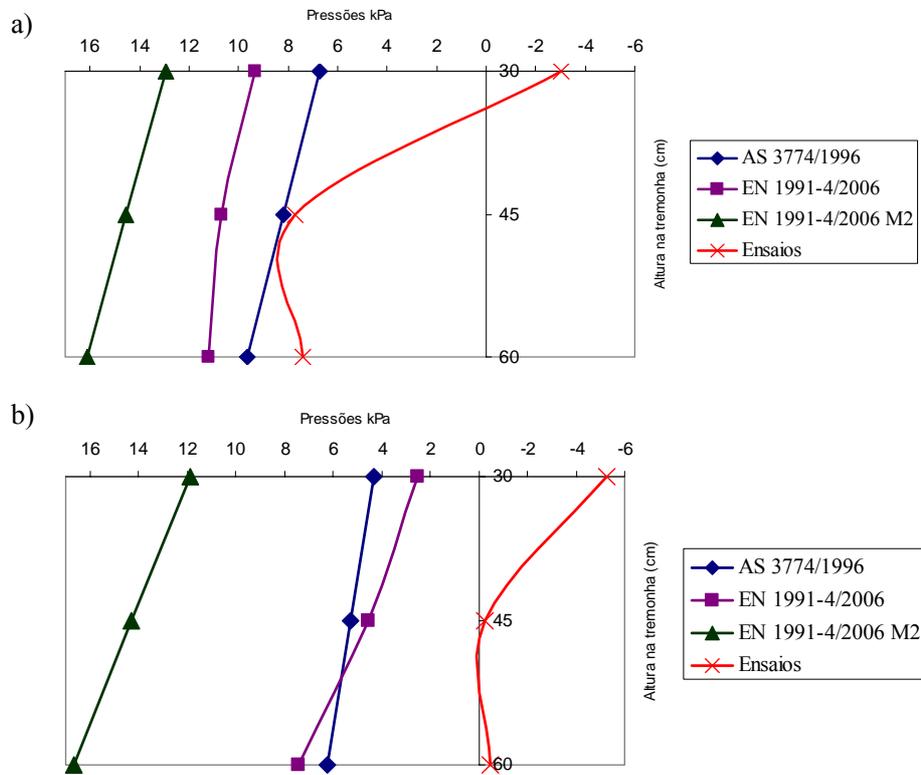


FIGURA 58 Resultados obtidos pela comparação dos diferentes métodos avaliados para relação  $H/D=2,40$  em ambos os lados da tremonha cônica. a) Comparação das pressões para o lado de maior excentricidade; b) Comparação das pressões para o lado de menor excentricidade.

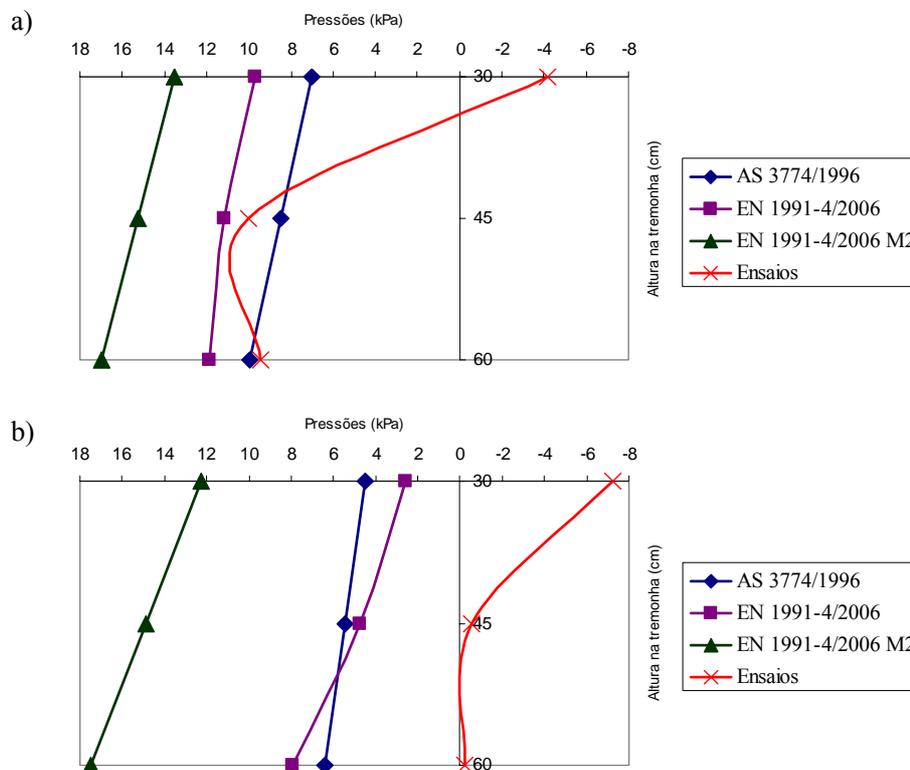


FIGURA 59 Resultados obtidos pela comparação dos diferentes métodos avaliados para relação  $H/D=3,49$  em ambos os lados da tremonha cônica. a) Comparação das pressões para o lado de maior excentricidade; b) Comparação das pressões para o lado de menor excentricidade.

No ensaio da tremonha cônica, observou-se que, em geral, as pressões obtidas foram menores que as pressões determinadas pela norma AS 3774:1996 e pelos dois métodos da norma EN 1991-4:2006. Porém, as deformações negativas sugerem que houve uma inversão de forças, ou seja, quando as pressões são positivas há tração na parte externa da chapa (parede externa da tremonha) e compressão na parede interna. Quando as deformações são negativas, há compressão nesta parede externa e tração na interna. Sendo assim, recomenda-se que novas pesquisas sejam realizadas no intuito de verificar com

mais cuidado a inversão dos sinais (deformações negativas). Tal fato não foi verificado na tremonha piramidal.

Apenas para a relação  $H/D = 3,49$  e considerando o lado de maior excentricidade da tremonha cônica foi observado no centro da mesma um valor de pressão superior ao que foi cálculo pela norma australiana. Já na norma européia, apenas na posição de 30 cm e  $H/D = 1,78$  o valor de ensaio superou o valor calculado por esta norma. Entretanto, este valor revelou-se praticamente igual ao da norma australiana, demonstrando a importância na comparação dos métodos.

Observou-se que o método 2 da EN 1991-4:2006 superestimou os valores de pressões e mostrou ser bastante conservador na determinação das pressões, portanto, não se recomenda a aplicação de tal método para o cálculo das pressões em tremonhas cônicas excêntricas. Além disso, outro fato chamou a atenção neste método sendo observado que, para lados de menor excentricidade, todos os outros métodos obtiveram valores de pressão inferiores ao lado de maior excentricidade, enquanto que o método 2 da EN 1991-4:2006 apresentou valores ligeiramente maiores no lado de menor excentricidade à medida que se aumentava a relação  $H/D$ .

Os valores negativos de pressão obtidos em ensaio devem-se às deformações negativas, evidenciando o fenômeno da ovalização em tremonhas cônicas. Para constatar esta ovalização, realizou-se um ensaio onde se buscou uma nova configuração dos relógios comparadores. Para este ensaio, foram retirados os relógios que estavam a 60 cm da parte superior da tremonha fixando-os na parte lateral da tremonha,  $90^\circ$  com os outros relógios, na posição 37,5 cm da parte superior da tremonha, ou seja, entre os relógios fixados a 30 cm e os fixados a 45 cm (ensaio especial descrito no item 3.9 do material e métodos). Como neste ensaio, os valores de deformação medidos pelos relógios

a 37,5 cm apresentaram deformações positivas, ficou evidenciado a tendência a ovalização à medida que se aumentavam as cargas.

Como os resultados calculados pelo método principal da EN 1991-4:2006 foram, em geral, ligeiramente maiores que os valores obtidos em ensaio, este método configurou ser o mais indicado para a determinação das pressões em tremonhas cônicas com descarga excêntrica sendo indicada a utilização do mesmo em projetos estruturais que contiverem tal dispositivo de descarga. Porém, como houve deformações negativas e conseqüentemente, pressões negativas, o que se traduz em inversão sentido das cargas (onde deveria haver compressão houve tração e vice-versa) recomendam-se maiores estudos no intuito de se verificar esta inversão de sinais. Além disso, sempre que possível, os resultados obtidos por esta norma devem ser comparados a outros resultados tal como os da AS 3774:1996 no intuito de verificar quais produzem os maiores valores. Assim, pode-se optar por projetos mais conservadores ou mais modernos. De fato, as melhorias implementadas na revisão da norma européia em 2006 bem como sua ampliação tornaram-na menos conservadora, mais moderna e adaptada as condições atuais em que se encontra a engenharia moderna, fato este constatado com a definição e aplicação da norma ao método dos estados limites, tendência mundial entre as normas. Já a norma australiana, desde 1996, configura-se entre as normas mais completas e modernas e seu suplemento lançado em 1997 não trouxe grandes modificações em relação a norma principal o que mostra que, mesmo sendo uma norma desenvolvida há 13 anos ainda perdura como uma norma referência.

Por fim, constatou-se que em se tratando de silos, estruturas bastante complexas do ponto de vista estrutural, as incertezas na definição das pressões - principalmente nas tremonhas - ainda é grande, devendo o calculista optar por projetos mais conservadores e coerentes, buscando sempre o embasamento no maior número possível de normas e literaturas sobre o assunto.

## 5 CONCLUSÕES

Por meio deste estudo pôde-se observar que:

- As normas AS 3774:1996 e a EN 1991-4:2006, método 1, não apresentaram resultados satisfatórios para a determinação das pressões em tremonhas metálicas piramidais com excentricidade.
- O método 2 da EN 1991-4: 2006 pode ser utilizado para a determinação das pressões em tremonhas piramidais excêntricas de silos metálicos esbeltos, porém esta teoria produz um superdimensionamento das pressões.
- Em tremonhas cônicas de silos metálicos esbeltos, tanto a norma EN 1991-4:2006 quanto a AS 3774: 1996 podem ser utilizadas para o cálculo das pressões de excentricidade sendo que a norma européia apresentou valores mais seguros. Recomenda-se, sempre que possível, comparar os valores gerados por ambas de forma a obter projetos mais seguros.
- Tremonhas cônicas apresentam tendência à ovalização à medida que aumentam as relações altura/diâmetro.
- Os ensaios realizados mostraram a grande variabilidade que existe nas pressões em tremonhas excêntricas.
- Ainda segundo os ensaios, verificou-se que tremonhas cônicas possuem maiores resistências mecânicas se comparadas a tremonhas piramidais.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, E. C. **Estudo teórico e experimental de tremonhas piramidais para silos metálicos elevados**. 1997. 317 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3774**: loads on bulk containers, commentary. Sydney, 1996. 62 p.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3774 supplement 1**: loads on bulk containers. Sydney, 1997. 18 p.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Eurocode 1**: actions on structures, part 4: silos and tanks – EN 1991-4. Bruxelas, 2006. 112 p.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Eurocode 1**: basis of design and actions on structures: actions on silos and tanks, part 4. ENV 1993-1-1. Bruxelas, 1993.

CALIL JUNIOR, C. **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais**. 1990. 198 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

CALIL JUNIOR, C. **Sobrepresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos**. 1984. 184 p. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) – Universidade Politécnica de Catalunya, Barcelona.

CALIL JUNIOR, C.; CHEUNG, A. B. **Silos**: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo. São Carlos: EESC/USP, 2007. 240 p.

CALIL JUNIOR, C.; NASCIMENTO, J. W. B.; ARAUJO, E. E. **Silos metálicos multicelulares**. São Carlos: EESC/USP, 1997. 175 p.

CANADIAN FARM BUILDING CODE. **CFBC part 2, structural design**. Ottawa: National Research Council of Canada, 1983. 25 p.

CHEUNG, A. B. **Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos**. 2007. 305 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Central de informações agropecuárias**. Disponível em: <[www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br)>. Acesso em: 20 ago. 2009.

DEUTSCHE NORM. **DIN 1055-6**: basis of design and actions on structures – part 6: design loads for buildings and loads in silo bins. Berlin: Verlag, 2005.

DEUTSCHE NORM. **DIN 1055**: lastannahmen fur bauten, blatt 6. Alemanha: Lasten in Silozelle, 1987. 12 p.

DRUCKER, D. C.; PRAGER, W. Soil mechanics and plastic analysis on limit design. **Quarterly of Applied Mathematics**, Providence, v. 10, n. 2, p. 157–165, 1952.

ENSTAD, G. On the theory of arching in mass flow hoppers. **Chemical Engineering Science**, New York, v. 30, n. 10, p. 1273-1283, Oct. 1975.

EUROPEAN FEDERATION OF CHEMICAL ENGINEERING. **Standart shear testing technique for particulate solids using the jenike shear cell**. London: Institution of Chemical Engineers, 1989. 46 p.

FEODOSIEV, V. I. **Resistencia de materiales**. Moscou: Ed. Mir, 1988. 583 p.

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

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

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

GUAITA, M.; COUTO, A.; AYUGA, F. Numerical simulation of wall pressure during discharge of granular material from cylindrical silos with eccentric hoppers. **Biosystems Engineering**, London, v. 85, n. 1, p. 101-109, May 2003.

HAAKER, G. **An introduction to the storage of bulk solids in silos.** Enschede: University of Twente, 1999. 45 p. Apostila.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO – 11697:** bases for design of structures: loads due to bulk materials. Geneva, 1995. 15 p.

JANSSEN, H. A. Verusche über getreidedruck in silozellen. **Verein Deutscher Ingenieure**, Berlin, v. 15, n. 3, p. 369-383, 1895.

JENIKE, A. W. **Storage and flow of silos.** Salt Lake City: University of Utah, 1964. 197 p. (Bolletín, 123).

JENIKE, A. W.; JOHANSON, J. R.; CARSON, J. W. Bin loads in 3 parts. **Journal of Engineering for Industry**, New York, v. 95. p. 1-20, 1973.

JOHANSON, J. R. Method of calculation rate of discharge from hoppers and bins. **Transactions of the Society of Mining Engineers**, Salt Lake City, v. 232, p. 69-80, 1965.

MCLEAN, A. G. A closer examination of the variation of wall friction angle with major consolidation stress. **Bulk Solids Handling**, Clausthal, v. 8, n. 4, p. 407-411, 1988.

MILANI, A. P. **Determinação das propriedades de produtos armazenados para projetos de pressões e fluxo em silos**. 1993. 162 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

PALMA, G. **Pressões e fluxo em silos esbeltos**. 2005. 109 p. Dissertação (Mestrado em engenharia de estruturas) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

PIEPER, K.; SCHÜTZ, M. **Bericht teüber das forschungsvorhaben: norm-mess-silo für schüttguteigenschafn**. Deutschland: Technische Universität Braunschweig, Lehrstuhl für Hochbaustatik, 1980. 109 p.

RAVENET, J. **Silos**. Barcelona: Laser Fotocomposicion, 1992. 508 p.

REIMBERT, M.; REIMBERT, A. **Silos: teoria e prática**. Argentina: Americalee, 1979. 415 p.

ROBERTS, A. W.; MCLEAN, A. G.; ARNOLD, P. C. Determination of bin geometry. In: ARNOLD, P. C. **Storage, flow and handling of bulk solids**. Stafa-Zurich: Trans Tech, 1987. p. 122-147.

ROTTER, J. M.; PHAM, L.; NIELSEN, J. On the specification of loads for the structural design of bins and silos. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BULK MATERIALS STORAGE, HANDLING AND TRANSPORTATION, INSTITUTION OF ENGINEERING, 2., 1986, Wollongong. **Proceedings...** Barton: Institution of Engineers, 1986. p. 241-247.

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

SCHULZE, D. Measurement of the flowability of bulk solids. In: BROWN, C. J.; NIELSEN, J. (Ed.). **Silos: fundamentals of theory, behavior and design**. London: Taylor & Francis, 1998. p. 18-52.

SCHWEDES, J. Consolidation and flow of cohesive bulk solids. **Chemical Engineering Science**, New York, v. 57, n. 2, p. 287-294, Jan. 2002.

SILVA, E. T. **Elementos pré moldados para silos quadrados de concreto armado**. 1998. 178 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade de Campinas, Campinas.

TEIXEIRA, L. G. R. **Determinação das propriedades físicas e de fluxo do café para projeto estrutural em silos e equipamentos**. 2006. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

TIMOSHENKO, S. P. **Theory of plates and shells**. New York: McGraw-Hill, 1940. 492 p.

TROTSKY, M. S. **Orthotropic bridges: theory and design**. Cleveland: JF Lincoln Arc Welding Foundation, 1968. 256 p.

TYKHONIUK, R.; TOMAS, J.; LUDING, S. Shear dynamics simulations of high-disperse cohesive powder. In: PARTICULATE SYSTEMS ANALYSIS, 2003, Harrogate. **Proceeding...** Harrogate: [s. n.], 2003. p. 1-5.

WALKER, D. M. An approximate theory for pressures and arching in hoppers. **Chemical Engineering Science**, New York, v. 21, n. 11, p. 975-997, Nov. 1966.