



ITAGILDO EDMAR GARBAZZA

**PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA
CÁLCULO DE PRESSÕES EM SILOS
VERTICAIS DE ACORDO COM A NORMA
AUSTRALIANA**

LAVRAS-MG

2011

ITAGILDO EDMAR GARBAZZA

**PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DE PRESSÕES
EM SILOS VERTICAIS DE ACORDO COM A NORMA AUSTRALIANA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia de Sistemas, área de concentração Modelagem de Sistemas Biológicos, para obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Francisco Carlos Gomes

LAVRAS - MG

2011

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

Garbazza, Itagildo Edmar.

Programa computacional para cálculo de pressões em silos
verticais de acordo com a norma australiana / Itagildo Edmar
Garbazza . – Lavras : UFLA, 2011.

77 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Francisco Carlos Gomes.

Bibliografia.

1. Lazarus. 2. AS3774. 3. Silo metálico. I. Universidade Federal
de Lavras. II. Título.

CDD – 003.3

ITAGILDO EDMAR GARBAZZA

**PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DE PRESSÕES
EM SILOS VERTICAIS DE ACORDO COM A NORMA AUSTRALIANA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia de Sistemas, área de concentração Modelagem de Sistemas Biológicos, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 25 de fevereiro de 2011.

Dr. José Wallace Barbosa Nascimento	UFCG
Dr. Tadayuki Yanagi Junior	UFLA

Dr. Francisco Carlos Gomes
Orientador

**LAVRAS - MG
2011**

Dedico este trabalho à minha esposa Renata e a meus filhos,
Gabriel e Sara, que me apoiaram durante todo o período do mestrado.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Tadayuki Yanagi Junior e José Wallace Barbosa Nascimento por se disporem a participar de minha banca de defesa.

Ao professor Francisco Carlos Gomes pela orientação e apoio durante todas as etapas do mestrado.

Ao professor Giovanni Francisco Rabelo pelo apoio e incentivo durante as aulas.

Aos colegas de mestrado em Engenharia de Sistemas, que sempre me apoiaram e me encorajaram durante o curso.

Aos colegas Luciano e Hellen, que compartilharam comigo um pouco de sua experiência.

Ao amigo Márcio Chaves que muito me ajudou e compartilhou desta vitória.

Ao professor Gabriel da Silva (IFMG-BambuÍ) por sua amizade e paciência.

Ao professor Carlos Bernardes (IFMG-Formiga) pelo apoio.

Aos meus pais por sempre me encorajarem e me fazer prosseguir.

Aos meus irmãos por me incentivarem e pela amizade irrestrita.

Aos meus filhos pelo seu amor incondicional e por estarem sempre alegres e prontos a me fazer sorrir, mesmo nos momentos em que estava completamente aflito.

À minha esposa por aceitar me dividir com tantas atividades e, mesmo assim, me apoiar.

A todos os professores do Programa de Mestrado em Engenharia de Sistemas.

A todos aqueles que direta ou indiretamente me influenciaram durante a realização do mestrado.

RESUMO

A busca por construção de estruturas para armazenamento que sejam seguras e economicamente viáveis é uma constante na engenharia. A não existência de uma norma brasileira que trate especificamente do projeto e ações em silos e a divergência existente entre normas estrangeiras requer que sejam feitos estudos para se conseguir o melhor desenvolvimento dessas estruturas de armazenamento. Silos são construções, que, em função de sua finalidade de utilização, estão sujeitas a algumas ações peculiares. No presente trabalho foram abordadas as pressões exercidas pelos produtos armazenados, sendo pressão horizontal, pressão vertical e pressão de atrito com a parede. As formulações teóricas, para a obtenção dessas ações são apresentadas e, em seguida, transformadas em um programa computacional. O programa foi desenvolvido para silo unicelular, de parede metálica, com fundo plano. Na última etapa do trabalho, alguns exemplos de aplicação são formulados e os resultados obtidos por meio do programa computacional são apresentados.

Palavras-chave: Lazarus. AS3774. Silo metálico.

ABSTRACT

It's constant on the engineering, the search for safe and economically viable structures for storage constructions. And because of the inexistence of a Brazilian rule that sorts out specifically about projects and actions in silos because of the existent divergence on foreign rules, it's being requested to carry out a study for the achievement of the best development for the construction of them. Silos are constructions which in according to their purpose, are subject to some peculiar actions. In this research, the exercised pressures for the stored products are discussed. They are horizontal, vertical and of friction with the wall pressures. There are showed theoretical formulations to obtain these actions, and then, they're transformed into a computer program. And it was developed for the isolated silo, with steel wall and flat bottom. In the end, there are some formulated examples of application and its results obtained by the computer program.

Keywords: Lazarus. AS3774. Silo metallic.

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1	Classificação dos silos segundo a relação H/D.....	17
Tabela 2	Classificação dos silos quanto ao fluxo.....	18
Tabela 3	Classificação dos silos quanto à geometria do fluxo.....	18
Tabela 4	Classificação dos silos conforme rugosidade da parede.....	19
Tabela 5	Classificação dos silos quanto à seção transversal.....	21
Tabela 6	Valores característicos das propriedades físicas dos produtos armazenados.....	22
Tabela 7	Classificação do produto armazenado quanto à granulometria..	24
Tabela 8	Análise da fluides, segundo Jenike (1964).....	41
Tabela 9	Resultado da Pressão Horizontal – Silos baixos / Superfície Polida.....	64
Tabela 10	Resultado da Pressão Vertical – Silos baixos / Superfície Polida.....	64
Tabela 11	Resultado da Pressão de Atrito com a parede-Silos baixos/Superfície Polida.....	65
Tabela 12	Resultado da Pressão Horizontal – Silos Esbeltos / Superfície Rugosa.....	65
Tabela 13	Resultado da Pressão Vertical – Silos Esbeltos / Superfície Rugosa.....	66
Tabela 14	Resultado da Pressão de Atrito com a Parede-Silos Esbeltos/Superfície Rugosa.....	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Evolução da produção brasileira.....	12
Figura 2	Silos de fundo plano.....	20
Figura 3	Formas mais comuns de silos com tremonha.....	20
Figura 4	Lugar geométrico de deslizamento do produto.....	26
Figura 5	Determinação do ângulo de atrito com a parede, utilizando a célula de Jenike.....	27
Figura 6	Lugar geométrico de deslizamento da parede e ϕ'_i com a parede.....	28
Figura 7	Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede.....	29
Figura 8	Propriedades físicas dos produtos armazenados.....	30
Figura 9	Principais tipos de fluxo.....	35
Figura 10	Determinação gráfica do tipo de fluxo.....	36
Figura 11	Variação geométrica dos silos e sua influencia no fluxo.....	37
Figura 12	Segregação por tamanhos.....	39
Figura 13	Pressões em silos de fundo plano – Rankine.....	52
Figura 14	Silos tremonha, diagrama de pressão lateral – Rankine.....	53
Figura 15	Distribuição da pressão horizontal e pressão de atrito em silos baixos.....	56
Figura 16	Distribuição das pressões em silos com fundo plano.....	58
Figura 17	Tela de cadastro das propriedades físicas dos produtos.....	62
Figura 18	Tela projeto de silo.....	62
Figura 19	Tela cálculo de pressões.....	63
Figura 20	Gráfico da pressão horizontal (Farinha de Trigo / Silo Baixo).....	67
Figura 21	Gráfico da pressão vertical (Cimento / Silo Esbelto).....	67
Figura 22	Gráfico da pressão de atrito com a parede (Milho / Silo Esbelto).....	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa do trabalho.....	14
1.2	Objetivo.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Silos.....	16
2.2	Classificação dos silos.....	16
2.2.1	Classificação dos silos quanto à esbeltez.....	17
2.2.2	Classificação dos silos quanto ao fluxo (descarga).....	17
2.2.3	Classificação dos silos quanto à geometria do fluxo.....	18
2.2.4	Classificação dos silos quanto à rugosidade da parede.....	19
2.2.5	Classificação dos silos quanto ao tipo de fundo.....	19
2.2.6	Classificação dos silos quanto à seção transversal.....	20
2.3	Propriedades físicas dos produtos armazenados.....	21
2.3.1	Granulometria.....	23
2.3.2	Peso específico.....	24
2.3.3	Ângulo de atrito interno e Efetivo ângulo de atrito interno.....	25
2.3.4	Ângulo de atrito interno e Efetivo ângulo de atrito interno.....	25
2.3.5	Ângulo de atrito com a parede.....	26
2.3.6	Ângulo de repouso.....	29
2.3.7	Tensão de deslizamento confinada.....	30
2.3.8	Tensão máxima de consolidação.....	31
2.3.9	Coesão.....	31
2.4	Pressões em silos.....	31
2.4.1	Pressões estáticas, iniciais ou de carregamento.....	32
2.4.2	Pressões dinâmicas ou de descarga.....	33
2.4.3	Pressões na tremonha.....	33
2.4.4	Pressões adicionais.....	33
2.5	Fluxo dos produtos armazenados.....	33
2.5.1	Tipos de fluxo.....	34
2.5.2	Influência da variação geométrica dos silos no fluxo.....	37
2.5.3	Obstruções de fluxo.....	38
2.5.4	Segregação.....	39
2.5.5	Função fluxo (FF).....	40
2.5.6	Fator fluxo da tremonha (<i>ff</i>).....	41
2.6	Parâmetro K.....	43
2.7	Pressões exercidas pelos produtos armazenados.....	44
2.7.1	Teoria de Janssen.....	49

2.7.2	Teoria de Rankine.....	50
2.7.3	Teoria de Walters.....	54
2.7.4	Palma (2005).....	54
2.7.5	Freitas (2001).....	55
2.7.6	Norma Australiana AS3774: 1996.....	56
3	MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1	Software desenvolvido.....	59
3.1.1	Visão geral do software.....	61
3.1.2	O banco de dados.....	63
3.1.3	Funções de cálculo de pressões.....	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
5	CONCLUSÕES	69
	REFERENCIAS	70
	APENDICE	74

1 INTRODUÇÃO

A ampliação da capacidade de armazenamento brasileira tem se tornado uma realidade cada vez mais constante. As infraestruturas de armazenamento, no período de 2001 a 2008, apresentaram um aumento de 48,9%, o que mostra um crescimento assustador na construção desse tipo de estrutura. (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2011).

A produção de grãos no Brasil, para a safra de 2011, deverá ser de 2,6% ou 3,85 milhões de toneladas maior que a safra anterior, conforme levantamento da CONAB (2011), divulgados em fevereiro de 2011.

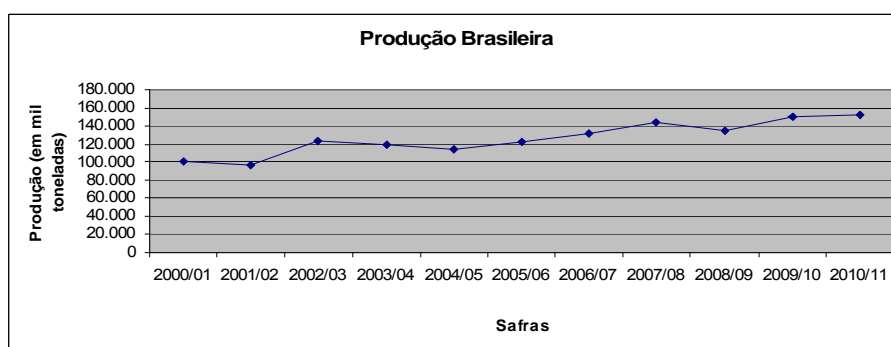


Figura 1 Evolução da produção brasileira
Fonte: (CONAB, 2011).

Com o crescente aumento da produção de grãos no país, torna-se cada vez maior a necessidade da construção de estruturas de armazenamento para estes produtos. Estas estruturas, chamadas silos, objetivam armazenar corretamente os produtos, sem o comprometimento de suas características físicas e químicas.

Silo é uma palavra de origem grega, que significa lugar escuro e cavernoso. (ARAUJO, 1997). Atualmente, a palavra silo é utilizada para

identificar um grande depósito para armazenar e conservar produto sólido, granular ou pulverulento, a granel, seja ele industrial ou agrícola. Podem ser projetados e construídos em diversas formas e tamanhos dependendo do tipo de utilização e do processo para os quais são requeridos. O termo unidade ou conjunto de armazenagem engloba tanto o silo propriamente dito como as máquinas de transporte, conservação, beneficiamento e mistura.

Os critérios utilizados no projeto estrutural de silos são similares aos utilizados em outras estruturas. Todavia, especificidades geométricas, funcionais de carregamento e descarregamento apontam para a necessidade de se ter um tratamento particularizado.

Para que o projeto de silo seja econômico, seguro e eficiente, algumas características devem ser consideradas:

- as ações que atuam na estrutura do silo, como pressões causadas pelo produto sobre as paredes, ventos, dentre outros;
- forma geométrica, sendo que a relação altura/diâmetro e a espessura devem ser determinados de maneira a garantir um dimensionamento ótimo;
- o carregamento e descarregamento;
- as propriedades físicas dos produtos armazenados.

Segundo Freitas (2001), uma unidade de armazenamento projetada de forma correta e bem conduzida apresenta vantagens como:

- Produto melhor conservado, protegido de insetos e roedores;
- Armazenamento seguro, racional e econômico;
- Economia de transportes, evitando transporte na época da safra e diminuindo a quantidade de impurezas e excesso de água;
- Formação de estoque regulador dos preços de mercado;

- Concentração de grandes quantidades do produto em áreas relativamente pequenas;
- Proteção da indústria contra as flutuações no preço das matérias-primas.

Os silos podem ser construídos com os mais diversos materiais como concreto, fibra de vidro, chapas de aço, madeira. No Brasil, os silos metálicos são largamente utilizados, em virtude de seu preço, durabilidade e qualidade na conservação de grãos, simplicidade de uso e facilidade de aeração dos grãos. Possui, ainda, rapidez na instalação e proporciona economia de espaço, no caso de silo vertical. A utilização deste tipo de silo veio substituir os silos graneleiros construídos de forma intensa no passado.

Os silos metálicos industrializados e instalados no Brasil são, na sua quase totalidade, em chapa galvanizada, ondulada e calandrada, parafusada formando anéis e os anéis formando o tubo ou cilindro de armazenamento. Segundo Freitas (2001), o silo metálico pode ser utilizado para o armazenamento de qualquer tipo de grão, apresentando como grande vantagem a possibilidade de se conseguir uma armazenagem livre de ratos e pragas.

“Apesar da intensa utilização destas unidades em todo o mundo e de serem as mais produzidas pela indústria, a previsão das pressões exercidas pelo produto armazenado é, ainda, divergente entre os pesquisadores e normas existentes.” (FREITAS, 2001, p.3).

1.1 Justificativa do trabalho

Segundo Nascimento (2008), silos verticais são muito utilizados na agricultura, indústria e mineração, sendo importante para o armazenamento dos produtos advindos destes setores. Ainda, temos que o Brasil é um dos maiores

produtores de grãos do mundo e possui pouco mais de 30% da sua capacidade de armazenamento. A necessidade de cooperativas, indústrias ou produtores de armazenar grandes quantidades de produtos e materiais em espaço reduzidos indica a demanda pela produção de silos para estes fins.

Ainda, conforme Cheung (2007), no Brasil a maior capacidade de armazenamento é em silos horizontais, que apresentam como principal problema a inadequada aeração do produto armazenado. Assim, a produção de silos verticais de pequena capacidade, utilizados tanto por indústrias quanto por agricultores, são essenciais para a logística de armazenamento e transporte do país.

A construção destes sistemas de armazenamento é um fator importante para o armazenamento de produtos agrícolas e industriais, para que o país seja competitivo no mundo globalizado. Apesar disso, o Brasil não possui uma norma específica para o projeto de silos verticais, objetivando investigar as incertezas na estimativa de pressões.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo principal a utilização da norma australiana AS3774: 1996 para gerar os valores de pressão no corpo do silo metálico verticais, possibilitando, assim, que projetistas possam determinar quais serão os materiais mais adequados a cada projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Silos

Silos são construções feitas em células individuais, geralmente de forma cilíndrica, podendo utilizar os mais diversos tipos de materiais para sua construção, como concreto, chapas metálicas, madeira e, quando agrupadas, denominam-se baterias, podendo ou não ser providas de sistemas de aeração.

A partir do século XIX foram construídos os primeiros grandes silos, sendo feitos de madeira e chegando a medir até 20 metros de altura. Inicialmente, os cálculos eram feitos acreditando que o produto armazenado se comportava como os líquidos, quanto às pressões exercidas na parede do reservatório. Posteriormente pode-se verificar que estas pressões eram muito elevadas, em função do atrito do produto com a parede. Este comportamento foi verificado por Jansen em 1895, modificando, então, a forma de cálculos de silos. Acontecendo, também, progresso no uso de materiais de construção dos silos, o que permitiu o aumento da capacidade de armazenamento dos silos (ARAÚJO; CALIL JÚNIOR, 1995).

Historicamente, Jenike e Johanson (1968) informam que os primeiros silos foram construídos em 1860 para armazenamento de grãos. Desde então, silos de grande, médio e pequeno porte têm sido construídos para o armazenamento de uma enorme variedade de produtos, sejam eles agrícolas ou não.

2.2 Classificação dos silos

Segundo a norma australiana AS-3774, os silos podem ser classificados de acordo com as seguintes características:

- Esbeltez do silo
- Tipo de fluxo durante a descarga
- Geometria do fluxo
- Tipo de fundo
- Rugosidade da parede
- Seção transversal

Estas características serão melhor apresentadas nas próximas seções.

2.2.1 Classificação dos silos quanto à esbeltez

A norma australiana AS-3774 relaciona a altura efetiva do produto armazenado com o diâmetro do silo para determinar o tipo do silo quanto à esbeltez, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 Classificação dos silos segundo a relação H/D

Tipo	Classificação	Relação H/D
A1	Baixo	Menor que 1,0
A2	Medianamente esbelto	Entre 1,0 e 3,0
A3	Esbelto	Maior que 3

2.2.2 Classificação dos silos quanto ao fluxo (descarga)

Quanto ao fluxo de descarga, a norma australiana AS-3774, prevê 5 (cinco) tipos diferentes de fluxo que são dependentes do ângulo da tremonha, da rugosidade da parede, das propriedades do produto armazenado, dentre outros fatores. Os tipos de fluxo determinados pela norma podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 Classificação dos silos quanto ao fluxo

Tipo	Classificação
B1	Fluxo de massa
B2	Fluxo de funil
B3	Fluxo de tubo
B4	Fluxo expandido
B5	Fluxo excêntrico

2.2.3 Classificação dos silos quanto à geometria do fluxo

Quanto à geometria do fluxo está previsto na norma australiana AS-3774, 4 (quatro) diferentes tipos, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 Classificação dos silos quanto à geometria do fluxo

Tipo	Classificação
C1	Trajeto axissimétrico (silo circular com abertura de descarga concêntrica)
C2	Trajeto Planar (silo de seção transversal retangular, com tremonhas em forma de cunha)
C3	Trajeto excêntrico (canal do fluxo não é simétrico)
C4	Configuração de superfície excêntrica livre, que acontece durante carga/descarga de silos baixos.

2.2.4 Classificação dos silos quanto à rugosidade da parede

A norma australiana AS-3774, classifica em 4 (quatro) as paredes do silo, quanto à sua rugosidade, conforme Tabela 4.

Tabela 4 Classificação dos silos conforme rugosidade da parede

Tipo	Classificação	Rugosidade (μm)
D1	Polido	0,01 até 1,00
D2	Liso	1,00 até 10
D3	Rugoso	10 até 1000
D4	Corrugado	Maior que 1000

2.2.5 Classificação dos silos quanto ao tipo de fundo

Quanto ao tipo de fundo, os silos podem ter:

- a) fundo plano: silo de fundo horizontal ou um fundo com paredes inclinadas de um ângulo menor ou igual a 20° com relação à horizontal.
- b) fundo com tremonha: fundo, em forma de funil, cujas formas mais comuns são as tronco-piramidais e as troncos-cônicas.

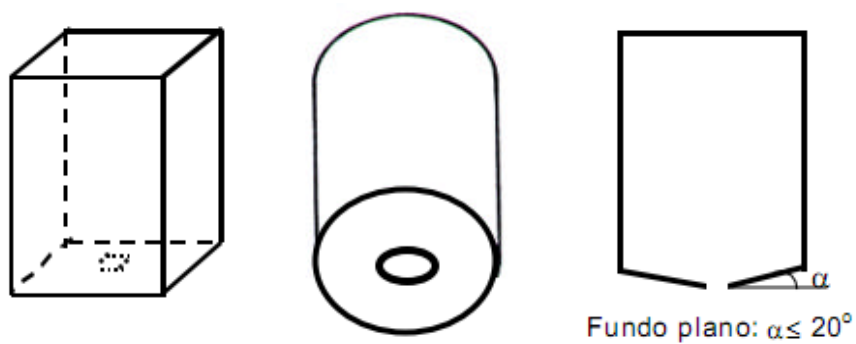
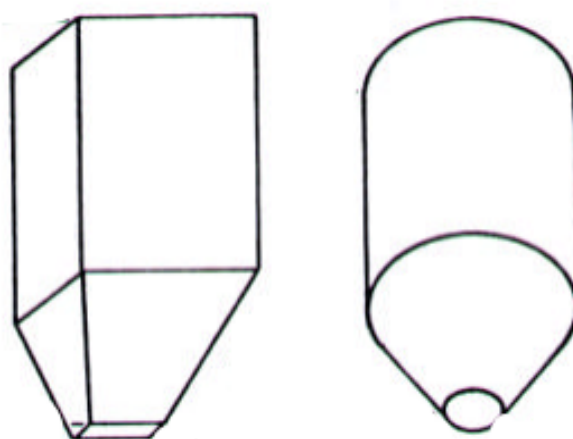


Figura 2 Silos de fundo plano
Fonte: (Freitas, 2001).



(a) Tremonha piramidal (b) Tremonha cônica

Figura 3 Formas mais comuns de silos com tremonha
Fonte: (Freitas, 2001).

2.2.6 Classificação dos silos quanto à seção transversal

A classificação quanto à seção transversal, segundo a norma australiana AS-3774, pode ser vista na Tabela 5.

Tabela 5 Classificação dos silos quanto à seção transversal

Tipo	Classificação	Dimensão característica (r_c)
G1	Circular	$0,25d_c$
G2	Quadrado	$0,25d_c$
G3	Retangular Para cálculo com referência ao menor lado (b) Para $l/b = 1,0$ Para $l/b = 1,5$ Para $l/b = 2,0$ Para $l/b = 4,0$ Para $l/b = 5,0$ Para cálculo com referência ao maior lado (l) Para $l/b = 1,5$ Para $l/b = 2,0$ Para $l/b = 4,0$ Para $l/b = 5,0$	$0,25d_c$ $0,27d_c$ $0,30d_c$ $0,33d_c$ $0,35d_c$ $0,30d_c$ $0,33d_c$ $0,40d_c$ $0,50d_c$
G4	Estrela	$0,30d_c$
G5	Poligonal	$0,27d_c$
G6	Anelar	$0,35d_c$
G7	Irregular	$0,30d_c$

2.3 Propriedades físicas dos produtos armazenados

A etapa inicial no cálculo das ações em silos é o estudo das propriedades do produto a ser armazenado. Para isso, é necessária a caracterização do produto, que consiste em determinar as propriedades físicas, ou propriedades de fluxo. Estas propriedades se referem ao comportamento do produto e surgem das forças que atuam sobre as partículas individualmente. As propriedades do produto influenciam no padrão do fluxo, pressões atuantes, geometria e

rugosidade da parede da célula de armazenamento e dispositivo de descarga, entre outros.

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 6).

Tabela 6 Valores característicos das propriedades físicas dos produtos armazenados

Tipo de Produto	Efetivo ângulo de atrito interno, em graus (°)		Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w), em graus(°)						Peso específico, KN/m ³	
			Tipo D1		Tipo D2		Tipo D3			
	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Médio	Superior
Açúcar	23	30	15	23	25	28	25	35	8	10
Cevada	26	33	15	24	18	27	25	32	7	8,5
Cimento	40	50	20	25	23	28	28	33	13	16
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
Trigo	26	32	15	25	18	30	25	32	7,5	9

Fonte: (Australian Standard - AS 1996).

Contribuições importantes foram apresentadas por Jenike citado por PALMA (2005), desenvolvendo um aparelho de cisalhamento direto, apropriado para a caracterização dos produtos armazenados, conhecido internacionalmente por “*Jenike Shear Tester*”.

No Brasil diversos pesquisadores apresentaram trabalhos importantes sobre o assunto, alguns citados abaixo:

Milani (1983): propôs metodologia de ensaio para determinação das propriedades dos produtos armazenados;

Calil Jr. (1997): alerta que, para qualquer das propriedades físicas, se deve verificar a consistência dos resultados, como por exemplo, o fato de que o ângulo de atrito do produto com a parede, é menor ou igual ao ângulo de atrito interno;

Gomes (2000): compara resultados teóricos com os obtidos por meio de medições diretas das pressões em um modelo piloto e um silo horizontal em escala real, com a relação entre as pressões horizontais e verticais. Com base nos resultados obtidos, propõe um novo método de cálculo fundamentado em um modelo empírico para a determinação das pressões horizontais nessas unidades.

2.3.1 Granulometria

O tipo de fluxo que irá ocorrer no silo está diretamente relacionado com a dimensão das partículas sólidas, pois, estas podem formar ou não obstrução ao fluxo. A fração fina das partículas sólidas é responsável pela capacidade do produto de fluir, já as partículas grossas são agentes passivos neste processo, indicando uma tendência ao agrupamento na boca de descarga, causando compactação do produto ao longo do canal do fluxo.

A norma australiana AS-3774 classifica os produtos em 5 (cinco) tipos diferentes, relacionado com o diâmetro das partículas destes produtos. A classificação é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 Classificação do produto armazenado quanto à granulometria

Classificação do produto armazenado	Diâmetro das partículas sólidas
Pó	Menores que 0,15 mm
Grão fino	Menores que 3 mm
Grão grosso	Menores que 12 mm
Granular	Maiores que 12 mm
Irregular	Fibras, fibras alongadas e outros.

2.3.2 Peso específico

Calil (1984 citado por NASCIMENTO, 2008) afirma não existir uma relação direta entre fluxo e peso específico e, por isso, não deve ser utilizado como um fator de fluxo. Ainda, Nascimento (2008) afirma que se deve determinar o peso específico do produto, visto que este é um importante parâmetro, para determinação do fluxo e das pressões em silos.

Peso específico (γ) é definido como a quantidade de massa de partículas sólidas dividida pelo seu volume total e multiplicado pela aceleração da gravidade ($g=9,81\text{m/s}^2$).

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

2.3.3 Ângulo de atrito interno e Efetivo ângulo de atrito interno

O diagrama de Mohr foi introduzido em 1882 pelo engenheiro civil alemão Otto Christian Mohr, professor da Stuttgart Polytechnikum e da Dresden polytechnikum. Importância do diagrama de Mohr:

- Permite a representação gráfica e a visualização do estado e tensões atuantes em um determinado ponto de um corpo.
- Conhecidos os valores de tensões principais, maior e menor atuantes, é possível a determinação da tensão normal e de cisalhamento atuante em planos a qualquer inclinação.
- Permite a representação de critérios de ruptura para o material em estudo.

2.3.4 Ângulo de atrito interno e Efetivo ângulo de atrito interno

Para uma dada condição de consolidação, o lugar geométrico de deslizamento de produtos granulares de fluxo livre sobre si mesmo é a reta obtida no plano σ - τ , pelo cisalhamento de uma amostra do produto sob várias cargas normais. Com as tensões principais σ_1 e σ_2 atuantes em um elemento do produto armazenado, para uma dada condição de consolidação, é construído o respectivo círculo de Mohr. A reta que tangencia todos os círculos é então chamada de lugar geométrico de deslizamento do produto (IYL). O ângulo de inclinação dessa reta que, para produtos de fluxo livre passa pela origem, é, então, chamado de ângulo de atrito interno do produto, ϕ_i (Figura 4(a)). Quando o produto não é de fluxo livre, a reta construída da forma acima indicada não passa pela origem. Nesse caso, a coordenada na qual essa reta corta a origem é denominada de coesão, c . O ângulo de inclinação dessa reta é, ainda, o ângulo de

atrito interno, mas a reta que passa pela origem e tangencia o círculo de Mohr definido pela maior e menor tensão principal é, então, denominada de efetivo lugar geométrico de deslizamento (EYL) e o respectivo ângulo de inclinação denominado efetivo ângulo de atrito interno, ϕ_e (Figura 4(b)). Das definições de IYL e EYL, pode-se concluir que para produtos de fluxo livre, $\phi_i = \phi_e$.

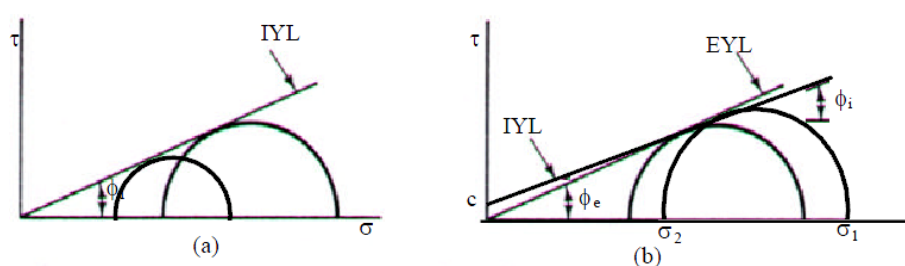


Figura 4 Lugar geométrico de deslizamento do produto
Fonte: Freitas (2001).

2.3.5 Ângulo de atrito com a parede

O aparelho de Jenike é, também, utilizado para determinar o ângulo de atrito do produto com a parede, bastando para isso, substituir a base da célula de cisalhamento por uma amostra do material da parede que se deseja avaliar (Figura 4) e define-se o lugar geométrico da parede para uma série de pressões de consolidação. A força de cisalhamento ou a tensão de cisalhamento τ_w que são necessárias para mover a célula de cisalhamento com o produto armazenado por meio do material da parede são medidas sob diferentes tensões normais ϕ'_w (TEIXEIRA, 2006).

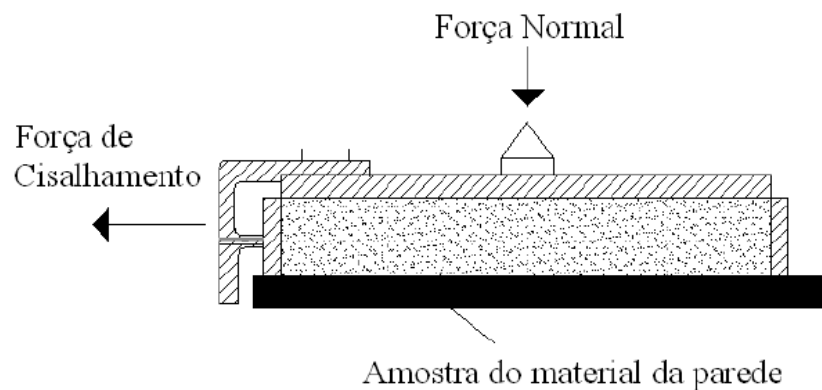


Figura 5 Determinação do ângulo de atrito com a parede, utilizando a célula de Jenike
Fonte: (Teixeira, 2006).

O lugar geométrico é desenhado no mesmo Figura do YL e o seu ponto de intersecção determinado com o círculo de Mohr de maior consolidação, (Figura 5). O YL da parede é, então, desenhado no mesmo diagrama do YL e seu ponto de intersecção determinado com o círculo de Mohr de maior consolidação. O ponto mais alto da intersecção é escolhido. O ângulo da linha reta deste ponto, por meio da origem, é o ângulo de atrito com a parede ϕ'_w para esta particular tensão de consolidação. Os ensaios são repetidos para outras tensões de consolidação (TEIXEIRA, 2006).

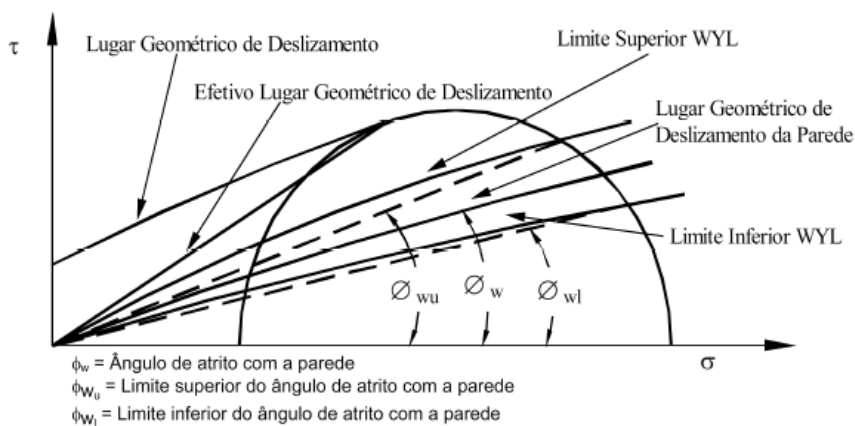


Figura 6 Lugar geométrico de deslizamento da parede e ϕ'_w com a parede
 Fonte: (Freitas, 2001).

Segundo Freitas (2001), o lugar geométrico de deslizamento na parede, WYL, para produtos de fluxo livre, pode ser obtido por uma linha direta que passa pela origem, como mostrado pela linha a no Figura 6 (a). No caso de produtos coesivos, o WYL é uma linha direta com uma ordenada c_w , como ilustrado pela linha b. Em alguns casos, a combinação da parede e o produto não segue exatamente este conceito ideal e um WYL um pouco curvado é obtido, como dado pela linha c. O ângulo de inclinação da reta que define o lugar geométrico de deslizamento da parede é denominado ângulo de atrito do produto com a parede, ϕ'_w .

No caso das linhas a e b, um valor constante pode ser obtido do ângulo entre o WYL e o eixo das pressões normais s . Para materiais correspondentes à linha c, em que a relação $\tau_w/\sigma_w = \tan\phi_w$ não é uma constante, mas depende do nível de tensão normal, pode-se definir como ângulo de atrito aquele da inclinação da linha que passa pela origem e pelo ponto de interesse no WYL para uma dada condição de consolidação, ϕ''_w , indicado no Figura 6 (b). Esta

definição tem a vantagem principal que, em todos os casos, a real relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal ao longo da parede é obtida (FREITAS, 2001).

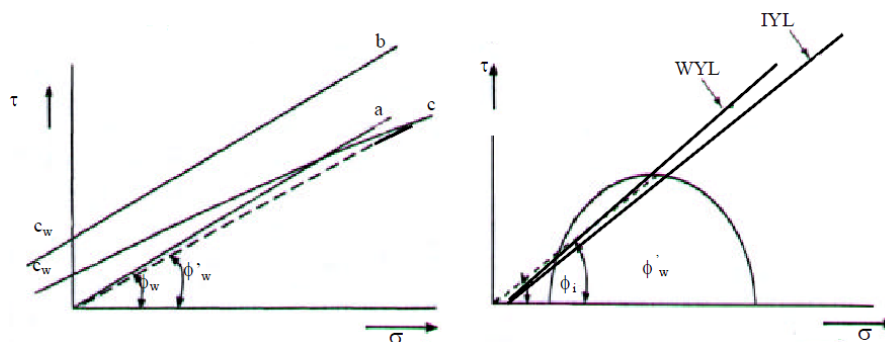


Figura 7 Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede
Fonte: (Freitas, 2001).

Em alguns casos é possível que, em virtude da coesão, o ângulo de atrito com a parede seja maior que o do ângulo de atrito interno ϕ_i , como definido anteriormente. Isto acontece quando uma fina camada de material gruda na parede e o deslizamento acontece ao longo desta camada. Esta situação é chamada de superfície rugosa. Para estes casos, Jenike (1970 citado por SILVA, 2003), sugere tomar o ângulo de atrito com a parede um pouco menor que o ângulo de atrito interno, em função do alisamento da camada estática aderida (Figura 6(b)). Isto implica que $\tan\phi_w = \sin\phi_i$ e a situação de tensão como determinada para o ponto de topo do círculo de Mohr é correspondente a um plano de deformação máxima.

2.3.6 Ângulo de repouso

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

plana. Este somente estará em equilíbrio se os grãos menos estáveis, situados na superfície da pilha, estiverem em equilíbrio estático. Desta forma, o ângulo formado pela superfície livre da pilha com o plano horizontal é o ângulo de repouso do material, definido pelos grãos menos estáveis e não confinados situados próximos à superfície da pilha.

É importante para cálculos de telhados de coberturas dos silos e inclinações de equipamentos.

2.3.7 Tensão de deslizamento incondfinada

A tensão incondfinada (σ_{ic}) resulta do círculo de tensões que é tangente ao lugar geométrico de deslizamento e que passa na origem do diagrama (σ, τ) (ver Figura 7). Esta tensão representa a resistência ao deslizamento do produto armazenado em uma superfície livre.

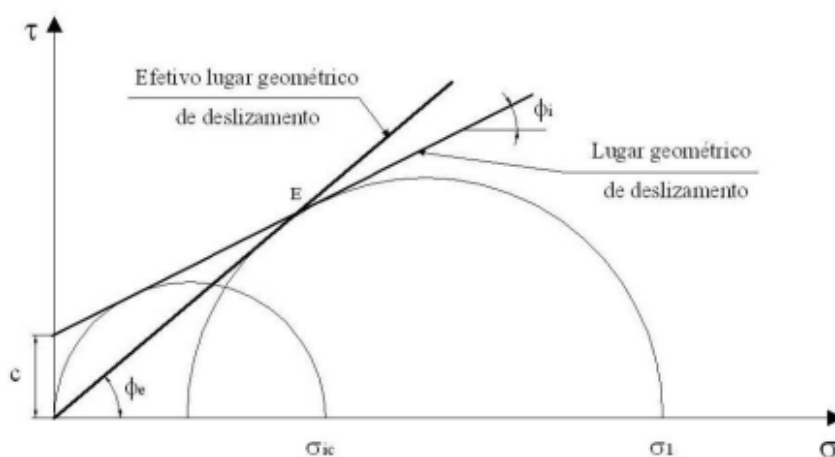


Figura 8 Propriedades físicas dos produtos armazenados
Fonte: (Nascimento, 2008).

2.3.8 Tensão máxima de consolidação

Com Calil Júnior, Nascimento e Araújo (1997), tem-se a definição de tensão máxima de consolidação:

A tensão máxima de consolidação (σ_c) é a tensão normal obtida pelo círculo de Mohr plotado por meio do ponto correspondente às condições de consolidação da amostra e tangente ao lugar geométrico de deslizamento. O maior dos dois valores de intersecção é a tensão máxima de consolidação (CALIL JÚNIOR; NASCIMENTO; ARAÚJO, 1997, p. 51).

2.3.9 Coesão

A coesão (c) varia com o grau de consolidação. Sendo encontrada estendendo-se o lugar geométrico de deslizamento de estado estável para interceptar o eixo da tensão de cisalhamento (τ). A intersecção do YL com o eixo τ descreve a coesão de um estado não consolidado. Portanto, a coesão é a tensão de cisalhamento sob tensão normal nula.

2.4 Pressões em silos

As pressões em silos têm sido objeto de estudo desde o século XIX. A primeira pesquisa que se tem notícias foi desenvolvida por Backer (1881 citado por RAVENET, 1983), que iniciou a pesquisa sobre pressões exercidas por um sólido nas paredes do silo.

Com Janssen (1895 citado por ALVES, 2001), surgiu o conceito do coeficiente K, que traduz a relação entre pressão horizontal e pressão vertical no silo.

Calil Júnior (1985) desenvolveu um trabalho experimental para verificar o comportamento das pressões laterais de carregamento e descarga.

É condição fundamental o conhecimento das ações atuantes sobre a estrutura, quando se projeta um silo. As ações a considerar, segundo a norma australiana, em projetos de silos são:

- Ações permanentes: constituídas pelo próprio peso da estrutura, equipamentos instalados.
- Ações variáveis: cargas em função do carregamento do produto; cargas induzidas pelo fluxo do produto durante a descarga; insuflação de ar; dilatação térmica; expansão do produto no descarregamento; ações dos ventos.
- Ações excepcionais: decorrente de impacto de veículos e pressões por explosões de pós.

A norma australiana AS-3774 prevê aumentos na pressão normal sobre a parede, quando qualquer uma das seguintes situações ocorrer: rápido descarregamento, mistura pneumática, expansão do produto armazenado em decorrência da absorção de umidade, carregamento excêntrico, sucção em virtude das mudanças térmicas adiabáticas, entre outras.

2.4.1 Pressões estáticas, iniciais ou de carregamento

Para o cálculo das pressões horizontais, pressões verticais e pressões de atrito com a parede é utilizada a formulação proposta por Janssen (1895 citado por ALVES, 2001), variando o valor do coeficiente de majoração.

A norma australiana AS-3774 apresenta formulações diferentes para a pressão vertical na base em silos com fundo plano, de acordo com o tipo de seção transversal do silo.

2.4.2 Pressões dinâmicas ou de descarga

De um modo geral, existem duas formas de determinar as pressões dinâmicas ou de descarga: calcular diretamente as pressões por meio de formulações matemáticas obtidas teoricamente, ou de forma indireta, utilizando um coeficiente de majoração, também chamado coeficiente de sobrepressão, aplicados às pressões estáticas.

2.4.3 Pressões na tremonha

As pressões normais à tremonha são calculados pela soma dos carregamentos em consequência do enchimento da tremonha e pelos carregamentos resultantes da sobrecarga vertical diretamente acima da transição.

2.4.4 Pressões adicionais

A adoção de pressões adicionais deve-se ao fato de que pressões assimétricas são inevitáveis, mesmo para silos com carregamento concêntrico e eixo simétrico, sendo dependentes das características do produto armazenado e das falhas na geometria das paredes, da tremonha e do silo.

2.5 Fluxo dos produtos armazenados

De acordo com Jenike e Johanson (1968 citados por NASCIMENTO, 2008), o fluxo acontece quando as pressões são tais que o cisalhamento ocorre sem destruir a isotropia do produto armazenado. Durante o fluxo, o peso específico do produto é uma função das pressões. Quando as pressões são constantes, o produto cisalha sob densidade constante. Quando as pressões

aumentam, o produto compacta e o peso específico também aumenta. Quando as pressões diminuem, produto expande, o peso específico diminui, e o fluxo pode prosseguir indefinidamente.

Verifica-se que o tipo de fluxo desenvolvido pelas partículas de um sólido está intimamente relacionado com as características geométricas do silo e pode, segundo Calil Júnior (1990), caracterizar o descarregamento do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de estagnação de movimento e se o silo pode ser esvaziado completamente. Determina, também, a distribuição das pressões nas paredes do silo e na fundação a integridade e o custo da construção.

A escolha do tipo de fluxo que irá ocorrer no silo é bastante importante, já que as pressões exercidas nas paredes dos silos sob condições de operações (carregamento e descarregamento) são diretamente relacionadas com o tipo de fluxo do silo.

2.5.1 Tipos de fluxo

O fluxo em silos refere-se à forma com que o produto armazenado desliza na operação de descarga do silo. A importância da análise de fluxo é defendida por Calil Júnior (1990), porque é este o responsável por determinar as características de descarga do material, tipos de segregação, zonas de materiais em movimentação, possibilidade de a célula ser esvaziada por completo, distribuição das pressões nas paredes e fundação, integridade e custo da construção. O fluxo é influenciado pelas propriedades do produto e em silos dotados de tremonha, pela geometria e rugosidade das paredes. De forma geral, os fluxos podem ser classificados como fluxo de massa e de funil:

Fluxo de massa: fluxo no qual todas as partículas armazenadas estão em movimento do começo até o fim do descarregamento. Este tipo de fluxo ocorre quando as paredes da tremonha são suficientemente inclinadas e lisas e não existem transições abruptas.

Fluxo de funil: caracterizado pela formação de um canal de partículas em movimento dentro de uma zona limitada, enquanto o produto adjacente à parede permanece estacionário. Este tipo de fluxo ocorre quando as paredes da tremonha são rugosas e se ângulo de inclinação com a vertical é elevado.

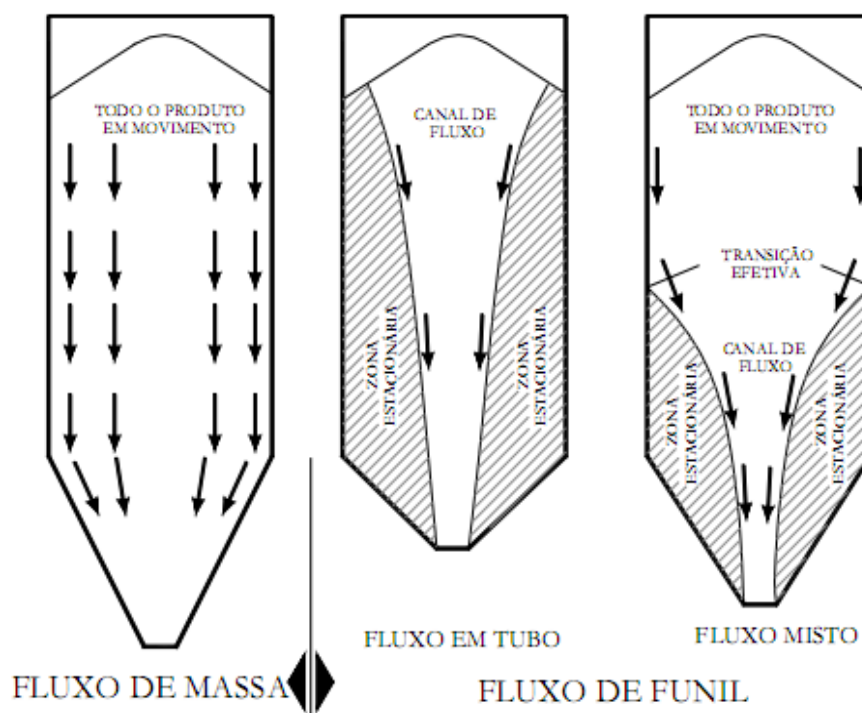


Figura 9 Principais tipos de fluxo
 Fonte: (Cheung, 2007).

Os silos com fluxo de funil apresentam menores capacidades de armazenamento, pois, apresentam áreas de produtos estagnados que só conseguem ser removidas quando do completo esvaziamento do silo. São

vantagens da escolha desse tipo de fluxo: menor desgaste das paredes, em decorrência do atrito do produto com a parede ser desprezível; pressões menores nas paredes do silo, em virtude da zona estagnada; possui tremonha menor, diminuindo, assim, a altura do silo, para uma mesma capacidade.

Em silos com fluxo de massa existem menores chances de formação de obstrução de fluxo e permite a determinação das pressões de forma mais fácil. Outra vantagem deste tipo de fluxo é a possibilidade de se descarregar totalmente o produto por gravidade, aproveitando dessa forma toda a capacidade do silo. Como desvantagens podem-se citar: necessidade de tremonhas mais altas; desgaste superficial das paredes; altas tensões localizadas na transição do corpo do silo com a tremonha.

A norma australiana AS-3774 apresenta dois Figuras para determinar o tipo de fluxo que irá ocorrer no silo. O tipo de fluxo é determinado em função do coeficiente de atrito com a parede, da inclinação das paredes da tremonha e do tipo de tremonha (cônica ou em cunha). Os Figuras podem ser vistos no Figura 6, a seguir.

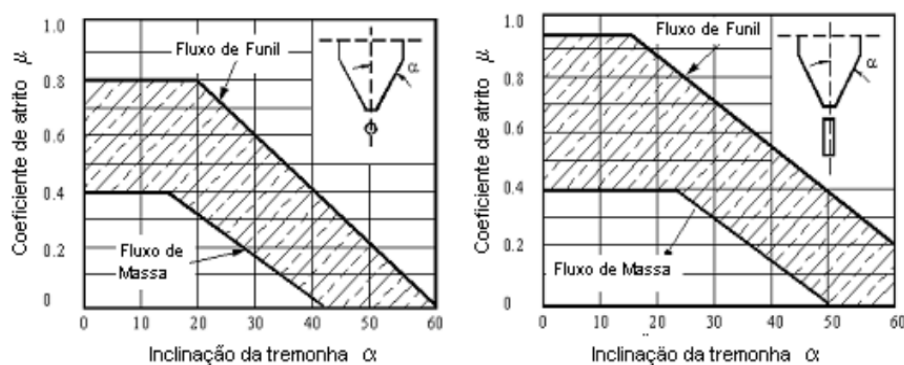


Figura 10 Determinação gráfica do tipo de fluxo
Fonte: (AS3774, 1996).

2.5.2 Influência da variação geométrica dos silos no fluxo

De acordo com a variação geométrica do silo, o fluxo de um produto pode assumir diferentes trajetórias (AS, 1996):

Trajeto de eixo axissimétrico: o centro de gravidade do produto fluindo coincide aproximadamente com o eixo vertical do silo, por exemplo, silo cilíndrico com abertura de descarga concêntrica.

Trajeto de eixo planar: é um fluxo uniforme que ocorre em silo de seção transversal retangular ou quadrada, com tremonhas em forma de cunha, onde uma das dimensões da bica de saída é paralela e de igual comprimento às paredes do silo. Neste caso, o canal do fluxo é simétrico em relação ao plano que passa pelo eixo longitudinal da abertura de saída.

Trajeto de eixo excêntrico: o canal do fluxo não é simétrico em relação ao eixo vertical do silo, ou em relação ao plano vertical que passa pelo eixo longitudinal do silo.

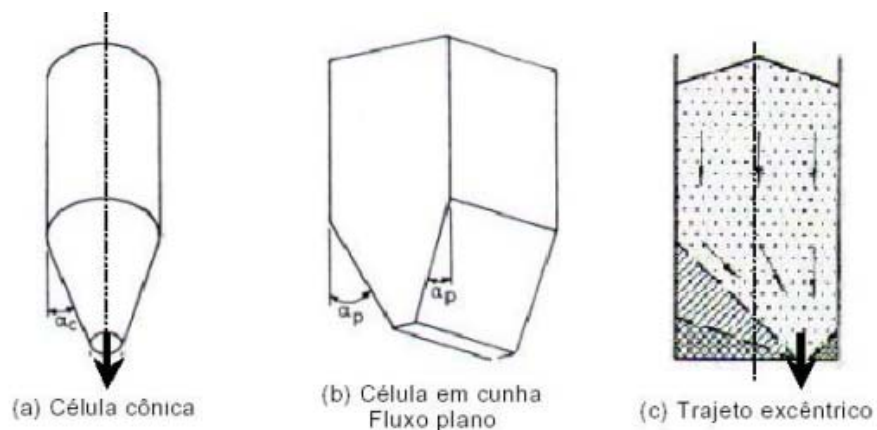


Figura 11 Variação geométrica dos silos e sua influencia no fluxo
Fonte: (AS3374, 1996).

2.5.3 Obstruções de fluxo

Alguns produtos armazenados, quando consolidados, adquirem resistência suficiente para suportar o seu próprio peso, formando, dessa forma, obstruções de fluxo. Basicamente temos dois tipos de obstruções de fluxo, arco e tubo. Apenas poderá ser considerado satisfatório o fluxo do produto se não ocorrer a formação dessas obstruções.

A formação destas obstruções causa sérios danos aos silos e, em especial, à tremonha, pois, quando rompem, atuam como um pistão, comprimindo o ar existente na tremonha, causando danos na boca de descarga e paredes laterais.

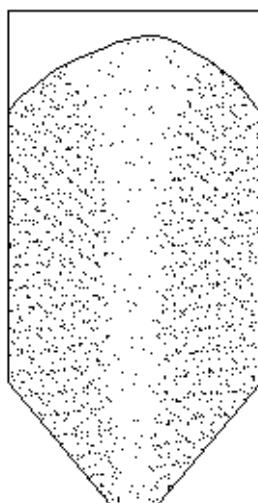
Segundo Palma (2005), a obstrução do tipo arco forma-se geralmente logo acima da boca de descarga, fazendo com que o fluxo seja interrompido. Este tipo de obstrução ocorre por causa da força de adesão existente entre as partículas do produto armazenado.

A formação de tubos é comum em silos com fluxo de funil contendo produtos coesivos e, se a consolidação do produto aumenta com o tempo de armazenagem, aumenta o risco de formação deste tipo de obstrução, conforme Nascimento (2008).

Ainda, de acordo com Palma (2005), a dimensão da abertura de descarga de um silo deve ser suficientemente grande para que não ocorram obstruções durante a descarga do produto armazenado. Normalmente, para silos com fluxo de massa, o objetivo é evitar a formação da obstrução em arco e para silos com fluxos de funil evitar a formação da obstrução em tubo.

2.5.4 Segregação

Este tipo de problema normalmente ocorre quando existe grande variação nas dimensões das partículas. A figura 12 apresenta um exemplo de segregação, onde as partículas maiores acumulam-se perto das paredes do silo, enquanto que as partículas menores acumulam-se próximas ao centro. No caso de silos com fluxo de funil, as partículas menores (localizadas no centro) seriam descarregadas primeiro enquanto que as maiores somente no final, causando problemas de heterogeneidade na descarga. No caso de silos com fluxo de massa, o produto não irá segregar na descarga.



Segregação

Figura 12 Segregação por tamanhos
Fonte: (Palma, 2005).

2.5.5 Função fluxo (FF)

A capacidade do produto de fluir depende da resistência desenvolvida, em virtude da consolidação e, com isso, o produto é capaz de formar um arco estável ou efeito tubo (CALIL JÚNIOR, 1990). A pressão de deslizamento não-confinada (f_c) é uma medida da resistência do produto em uma superfície livre, apresentando a função da máxima pressão de consolidação, denominada função fluxo. Sua determinação é feita traçando os pontos de tensão máxima de consolidação em função da resistência não confinada de deslizamento.

Segundo Prescott (2000), a fluidez do produto armazenado não pode ser expressa por um valor único ou um índice. A fluidez é o resultado da combinação das propriedades físicas com os equipamentos usados para manipulação, armazenagem ou processamento do produto. Porém, para uma rápida análise do comportamento de fluxo do produto, pode-se tomar os seguintes limites da Função Fluxo apresentados por Jenike (1964) na Tabela 8.

Portanto, quanto maior o valor de FF , melhor é o fluxo do produto armazenado. Cada produto armazenado tem suas próprias Função Fluxo e Função Fluxo com o tempo. Produtos sem coesão, de fluxo livre, geralmente não causam problemas de fluxo.

Além disso, a capacidade de fluir (fluidez) de alguns produtos armazenados, geralmente grãos finos (partículas menores que 100 μm), torna-se pior com o aumento da umidade e do tempo de armazenamento, aumentando a possibilidade de ocorrência de obstruções de fluxo.

Tabela 8 Análise da fluidez, segundo Jenike (1964)

Função Fluxo (FF)	Análise da Fluidez
$FF < 2$	Produtos muito coesivos, não fluem
$2 < FF < 4$	Produtos coesivos
$4 < FF < 10$	Produtos que fluem facilmente
$FF > 10$	Produtos de fluxo livre

2.5.6 Fator fluxo da tremonha (ff)

“O fator fluxo da tremonha (ff) é usado para indicar a fluidez do canal. Quanto maior a tensão máxima de consolidação em um canal, menor a tensão principal atuando na obstrução; menor será a fluidez no canal, ou seja, quanto menor o valor do fator fluxo menor é a fluidez do canal.”(CALIL; JÚNIOR NASCIMENTO; ARAÚJO, 1997).

O fator de fluxo da tremonha (ff) que diferentemente da Função Fluxo do produto (FF), é uma propriedade do conjunto silo-produto, dependendo de algumas características de ambos. Para calcular o fator de fluxo do sistema é necessário conhecer: o efetivo ângulo de atrito interno do produto (ϕ_e), o ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w), a geometria e inclinação da tremonha (α).

O cálculo do fator de fluxo (ff) supõe a solução das equações diferenciais representativas das tensões que surgem nos silos durante a descarga. Tais resoluções foram publicadas por Jenike, para silos de diferentes geometrias, na forma de Figuras denominados de Figuras de fatores de fluxo. Assim como a Função Fluxo (FF), o fator fluxo da tremonha (ff), também, é usado para indicar a fluidez do produto armazenado. Porém, ao contrário da Função Fluxo, quanto mais baixo seu valor, melhor é a fluidez do produto. O fator fluxo da tremonha é

representado pela relação entre a tensão principal máxima de consolidação (σ_1) e a tensão que atua em um arco estável imaginário, formado por partículas do produto, sustentado pelas paredes da tremonha (σ_1').

$$ff = \sigma_1/\sigma_1' \quad (1)$$

Segundo Palma (2005), o fator fluxo da tremonha pode ser determinado conforme equações propostas por Enstad (1975):

$$F(\alpha) = \left(\frac{65}{130 + \alpha} \right)^m \left(\frac{200}{200 + \alpha} \right)^{1-m} \quad (2)$$

$$2\beta = \phi_{ws} + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}\phi_{ws}}{\text{sen}\phi_{es}} \right) \quad (3)$$

$$\theta = \beta + \alpha \quad (4)$$

$$X = \frac{2^m \text{sen}(\phi_{ws})}{1 - \text{sen}(\phi_{es})} \left[\frac{\text{sen}(\beta + \theta)}{\cos(90 - \alpha)} + 1 \right] \quad (5)$$

$$Y = \frac{[2(1 - \cos\theta)]^m \theta^{1-m} \cos(90 - \alpha) + \text{sen}\beta(\text{sen}\theta)^{1+m}}{(1 - \text{sen}\phi_{es})(\text{sen}\theta)^{2+m}} \quad (6)$$

$$ff = \frac{Y(1 + \text{sen}\phi_{es})}{2(X - 1)F(\alpha)\cos(90 - \alpha)} \quad (7)$$

onde:

ϕ_{es} = valor superior do efetivo ângulo de atrito interno

ϕ_{ws} = valor superior do ângulo de atrito com a parede

$m = 0$ para tremonhas retangulares, onde $L \geq 30$

$m = 1$ para tremonhas de eixo simétrico

Para tremonhas retangulares com $L < 30$, o valor de “m” será encontrado por interpolação entre 0 e 1.

2.6 Parâmetro K

A relação entre as pressões horizontal e vertical em qualquer ponto de uma massa granular é definida como a relação K. Os três estados de tensão associados a K são denominados estados ativos K_a , passivo K_p e em repouso K_o . Os dois primeiros são resultados dos deslocamentos da parede do silo (K_a é relativo ao deslocamento de dentro para fora e K_p na direção oposta). K_o ocorre quando uma estrutura de retenção inflexível não permite a deformação lateral da periferia do produto (BLIGHT, 1988 citado por FREITAS, 2001).

A norma australiana AS-3374:1996 adota a fórmula proposta por Walker (NASCIMENTO, 2008) para a determinação do valor de K, limitando K como maior ou igual a 0,35.

$$K = \frac{1 + \operatorname{sen}^2 \phi_i - 2\sqrt{(\operatorname{sen}^2 \phi_i - \mu^2 \cos^2 \phi_i)}}{4\mu^2 \cos^2 \phi_i} \geq 0,35 \quad (8)$$

São fornecidos os valores do limite inferior e superior para ϕ_i e ϕ_w em função da rugosidade da parede.

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

2.7 Pressões exercidas pelos produtos armazenados

Os primeiros silos foram construídos admitindo-se a hipótese de que os produtos armazenados comportavam-se como líquidos, com aplicação da teoria hidrostática para o cálculo das pressões. Objeto de estudos desde o século passado, as pressões exercidas por um sólido nas paredes de um silo, começaram a ser pesquisadas por Baker em 1881. Em 1892, Roberts, na Inglaterra, realizou os primeiros testes para determinar pressões laterais e verticais em silo, considerando que parte do peso do produto armazenado é transferida por atrito para as paredes dos silos. Em 1895, Janssen confirmou as hipóteses de Roberts, vindo a fornecer uma das mais importantes contribuições para o desenvolvimento da teoria sobre pressões em silos. O modelo de Janssen é até hoje utilizado, tendo sido adotado como base de cálculo em diversas normas (GOMES, 2000).

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

Airy, em 1897, na Inglaterra, foi o primeiro a fazer a distinção entre silos altos e baixos com uma proposta de um modelo para o cálculo de pressões em silos, analisando o problema de um ângulo totalmente diferente do utilizado por Janssen (GOMES, CALIL JÚNIOR, 2005). Empregando

uma massa de produto em forma de cunha deslizando sobre si mesma e exercendo uma força sobre a parede, são fornecidos os valores da pressão lateral.

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

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

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

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

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

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

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

De acordo com Dantas (2004), as ações provocadas pelo produto armazenado (empuxo), devem ser avaliadas a partir das pressões laterais nas estruturas consideradas rígidas não-deslocáveis e deslocáveis. Devem

ser verificadas a rigidez da estrutura e sua deslocabilidade (rotação, translação), bem como a forma da deslocabilidade relativa entre a estrutura e o maciço do produto armazenado, aplicando as teorias de Coulomb e Rankine.

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

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

De acordo com Negrisoni (1997), os silos horizontais requerem nos projetos uma análise criteriosa das ações. Estas devem ser levantadas e combinadas para a condição mais desfavorável. As ações em razão do peso próprio, peso dos equipamentos, ventos e outros (recalques diferenciais de apoios, proteção, vibração de máquinas) devem ser consideradas, mesmo sabendo que suas parcelas de contribuição nas combinações são inferiores quando comparadas às ações por causa do produto armazenado.

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

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

As normas internacionais apresentam um vasto e avançado estudo no campo dos silos verticais e fazem recomendações sobre o comportamento das pressões dos produtos armazenados.

Ainda existem incertezas consideráveis com relação às pressões que atuam nos silos. Uma revisão das normas existentes indica grandes diferenças entre as recomendações para as cargas dos silos. Dessa forma as

contribuições no campo experimental são importantes servindo como subsídio para os códigos normativos e confrontação dos refinamentos dos cálculos.

2.7.1 Teoria de Janssen

A formulação proposta por Janssen, para obtenção das pressões estáticas, foi a mais aceita dentre a literatura disponível. Essa teoria é conhecida como método da camada elementar, que consiste na consideração do equilíbrio de uma massa de produto em repouso, válida somente para a condição de carregamento. As hipóteses em que esta teoria é baseada são:

- a) As pressões horizontais são constantes no mesmo plano horizontal.
- b) O valor do ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w) é constante.
- c) O peso específico do produto é uniforme.
- d) As paredes do silo são totalmente rígidas.
- e) A relação entre as pressões horizontais e verticais (K) é constante em toda a altura do silo, sendo:

$$K = \frac{P_h}{P_v} \quad (9)$$

O valor empírico para K é representado por:

$$K = \frac{1 - \text{sen}\phi_i}{1 + \text{sen}\phi_i} \quad (10)$$

Fórmula de Janssen para o cálculo teórico da pressão horizontal:

$$Ph = \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{A}{U} \cdot \left(1 - e^{-zK\mu\frac{U}{A}} \right) \quad (11)$$

onde:

$P_h(z)$ – pressão horizontal atuando sobre a seção transversal do produto armazenado na profundidade z ;

γ – peso específico do produto armazenado;

A – área da seção transversal do silo;

U – perímetro do silo;

μ – coeficiente de atrito com a parede, obtido por meio do ângulo de atrito com a parede (ϕ_w), sendo $\mu = \tan \phi_w$

K – relação entre a pressão horizontal e a pressão vertical;

z – distância da superfície superior do produto armazenado ao ponto onde se quer calcular a pressão.

A partir da equação (12) pode-se calcular os valores de pressão vertical:

$$P_v = \frac{P_h}{K} \quad (12)$$

E a pressão de atrito com a parede é dada pela seguinte equação;

$$P_w = \mu_w P_h \quad (13)$$

Logo, as pressões em um silo vertical segundo a teoria de Janssen são dependentes dos seguintes parâmetros:

$$P(\mu_w, K, \gamma, z, A, U) \quad (14)$$

2.7.2 Teoria de Rankine

Rankine estudou, em sua teoria publicada em 1857, o estado de tensões dentro de um maciço granular, fofo, não coesivo. As pressões lateral e vertical

que atuam dentro do elemento, a uma profundidade z , constituem um par de conjugado de tensões. Considerando as propriedades do círculo de Mohr representativo do estado de ruptura do maciço, podem-se calcular os coeficientes de empuxo ativo e passivo para um terrapleno horizontal, a partir das componentes normal e cisalhante. Os valores de p_a e p_p podem ser calculados em função de p_v , bem como as relações p_a/p_v e p_p/p_v , denominados, coeficiente de empuxo ativo e passivo. As pressões laterais valem, portanto segundo as equações (15) e (16).

$$p_a = K_a p_v = K_a \gamma z \cos \phi_r \quad (15)$$

$$p_p = K_p p_v = K_p \gamma z \cos \phi_r \quad (16)$$

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

Pela teoria de Rankine as pressões laterais variam linearmente com a profundidade e os valores dos empuxos ativo e passivo, por unidade de largura, de uma estrutura de arrimo, de altura h , segundo equações (17) e (18).

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma h^2 K_a \cos \phi_r \quad (17)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma h^2 K_p \cos \phi_r \quad (18)$$

onde K_a é dado pela equação (19).

$$K_a = \frac{\cos \phi_r - \sqrt{\cos^2 \phi_r - \cos^2 \phi_i}}{\cos \phi_r + \sqrt{\cos^2 \phi_r - \cos^2 \phi_i}} \quad (19)$$

A teoria de Rankine baseia-se na aplicação de um estado de tensão em um maciço granular, fofo, não coesivo e semi-infinito. Esta foi desenvolvida baseada na hipótese de que a deformação no maciço produz um estado ativo ou passivo de pressões, conforme a pressão vertical seja a maior ou a menor pressão principal (Figura 7).

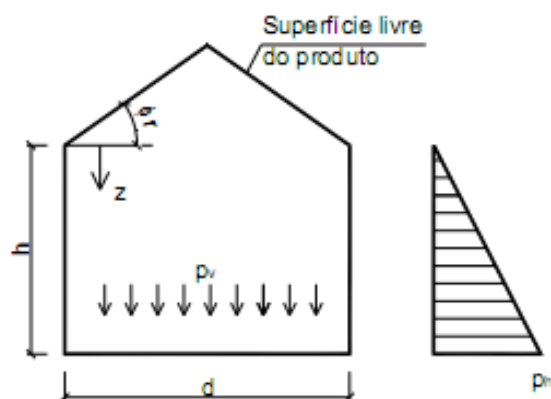


Figura 13 Pressões em silos de fundo plano – Rankine
Fonte: (Freitas, 2001).

Rankine subdividiu as formulações para as pressões horizontais e verticais para dois casos distintos. No primeiro, considera-se que a superfície de topo do produto armazenado é horizontal. Neste caso a pressão horizontal (p_h) estática na profundidade z , pode ser expressa pela equação (20).

$$p_h = K \gamma z \quad (20)$$

em que, o parâmetro K é definido pela equação (21):

$$K = \frac{1 - \text{sen}\phi_r}{1 + \text{sen}\phi_r} \quad (21)$$

A pressão vertical (p_v) estática na profundidade z , abaixo da superfície, pode ser expressa pela equação (22):

$$p_v = \gamma z \quad (22)$$

No segundo caso, Rankine considera a superfície do produto armazenado com inclinação igual ao ângulo de repouso (ϕ_{wr}). Para esse caso a pressão horizontal estática na profundidade z , pode ser expressa como na equação (23):

$$p_h = \gamma z \cos^2 \phi_r \quad (23)$$

Finalmente, a pressão vertical estática na profundidade z é definida pela equação (24):

$$p_v = \gamma(z + a_0 \text{tg}\phi_r) \quad (24)$$

em que o parâmetro a_0 é definido como a distância genérica para cálculo da pressão conforme figura 14.

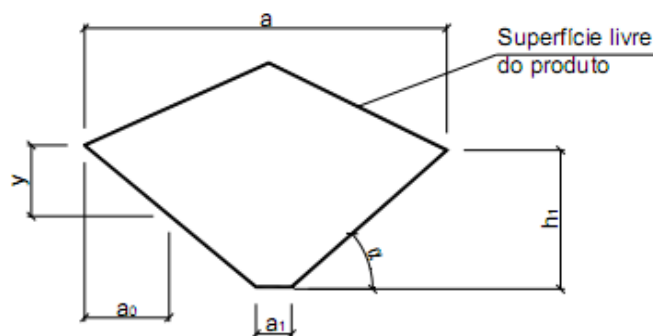


Figura 14 Silos tremonha, diagrama de pressão lateral – Rankine
Fonte: Gomes(2000).

2.7.3 Teoria de Walters

A teoria de Walters, para as pressões no corpo do silo são baseadas na teoria de Janssen, ou seja, no equilíbrio de uma fatia horizontal. Uma diferença importante é que não é necessário que a tensão vertical seja constante na seção transversal. A grande vantagem de sua teoria é que é necessária apenas a determinação do ângulo de atrito com a parede e do efetivo ângulo de atrito interno para usar seus equacionamentos.

Esta teoria pode ser aplicada para o menor dos seguintes limites:

$$2\alpha < \pi - \phi_e - \phi_w - \cos^{-1} \left(\frac{\text{sen} \phi_w}{\text{sen} \phi_e} \right) \quad (25)$$

$$2\alpha < \phi_e - \phi_e + \cos^{-1} \left(\frac{\text{sen} \phi_w}{\text{sen} \phi_e} \right) \quad (26)$$

Valores maiores de α não são considerados, pois, WALTERS (1973) considera que se α ultrapassar esses limites, o fluxo de massa não ocorrerá. Portanto, a aplicabilidade dessa teoria se restringe a pequenas inclinações de tremonhas, não podendo ser aplicada para a maioria dos casos na prática.

2.7.4 Palma (2005)

Palma (2005) propõe que sejam adotadas as recomendações propostas pela norma DIN 1055-6:2000 para avaliação das pressões adicionais e da norma EUROCODE 1/Part 4:1995 para determinação das pressões de carregamento e descarga para silos verticais esbeltos ($h/d > 1,5$), pelos motivos:

- são as normas mais utilizadas atualmente na determinação das pressões por causa do produto armazenado;
- englobam o efeito de pressões assimétricas (adicionais), no carregamento e na descarga. Facilitam a determinação, propondo um procedimento simplificado e a norma DIN 1055-6 não limita a aplicação em função do diâmetro do silo;
- a norma DIN 1055-6 e, principalmente, a EUROCODE 1/Part 4 foram conservadoras tanto para as pressões horizontais no corpo do silo, como para as pressões na tremonha.

2.7.5 Freitas (2001)

Freitas (2001) elabora uma proposta de cálculo de pressões em silos baixos ($h/d < 1,0$). Tendo em vista os valores experimentais obtidos recomenda a adoção do modelo linear de Rankine-Calil, para cálculo das pressões horizontais.

$$p_h(z) = K\gamma z \quad (27)$$

Sendo o valor de K, definido pela equação (21)

A partir da análise dos valores obtidos experimentalmente, Freitas (2001), propõe a formulação empírica para a determinação das pressões verticais na base do silo, como a seguir:

$$p_v(h) = \gamma h \left[1 - 0,9 \left(\frac{x}{d} \right)^2 \right] \quad (28)$$

E x varia de $-R$ a R $x=0$ no centro do silo.

2.7.6 Norma Australiana AS3774:1996

Para silos de baixa relação altura/diâmetro ($h/d < 1$), as pressões horizontais e de atrito têm as mesmas expressões que as de Janssen. Nesta situação, a norma permite linearizar a pressão horizontal e a pressão de atrito na parte superior do perfil de carregamento. Sendo que no ponto onde a superfície superior do produto armazenado encontra a parede do silo, a pressão pode ser reduzida a zero. Abaixo deste ponto a pressão varia linearmente, até a profundidade $z = 1,5h_0$, conforme a equação 11 e figura 15.

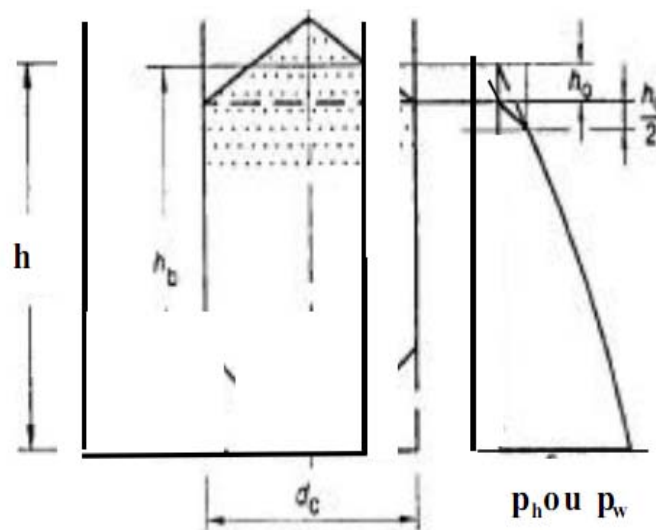


Figura 15 Distribuição da pressão horizontal e pressão de atrito em silos baixos
Fonte: (AS3374, 1996).

A pressão vertical na base, para $h/d < 1$ e silos cilíndricos é dada pela equação:

$$p_v(x) = 1,25 p_{vi} \left[1 - 1,6 \left(\frac{x}{d} \right)^2 \right] \quad (29)$$

$$p_{vi} = \gamma h \quad (30)$$

Sendo x a coordenada radial no silo circular e d o diâmetro do silo.

Para silos quadrados com relação $h/d < 1$, a pressão vertical na base é dada pela equação:

$$p_{vf}(x) = 1,36 p_{vi} \left[1 - 1,6 \left(\frac{x}{b} \right)^2 - \left(\frac{y}{l} \right)^2 \right] \quad (31)$$

Sendo x a coordenada com origem no centro da base e normal à maior parede e y a coordenada com origem no centro da base e normal à menor parede.

Independente da relação h/d , a base deve ser projetada para suportar trações em decorrência do cisalhamento horizontal (figura 10 (c)) que age do centro do silo para as extremidades. Este cisalhamento é decorrente do atrito do produto com o material do fundo do silo e será determinado pelas equações:

Para silos cilíndricos:

$$P_{sf}(x) = 0,3 p_{vi} \left[\left(\frac{2x}{d_c} \right) - \left(\frac{2x}{d_c} \right)^2 \right] \quad (32)$$

Para silos quadrados:

$$P_{sf}(x) = 0,3p_{vi} \left[\left(\frac{2x}{b} \right) - \left(\frac{2x}{b} \right)^2 \right] \quad (33)$$

$$p_{sf}(x) = 0,3p_{vi} \left[\left(\frac{2y}{l} \right) - \left(\frac{2y}{l} \right)^2 \right] \quad (34)$$

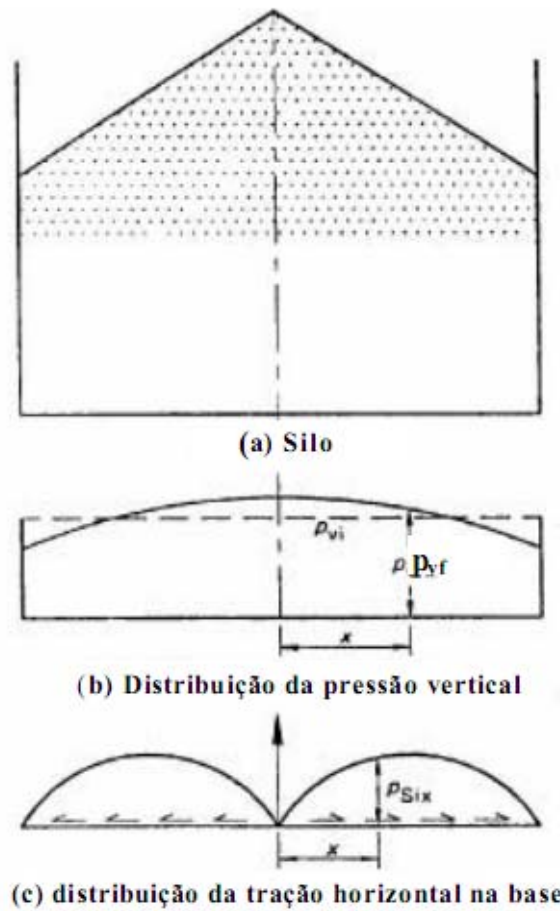


Figura 16 Distribuição das pressões em silos com fundo plano
Fonte: (AS3774, 1996).

Para o caso de $h/d \geq 1$, as formulações para as pressões horizontais e de atrito permanecem as mesmas, mas a pressão vertical na base é modificada, substituindo $p_{vi}=\gamma h$, por $p_{vi}=p_h/K$, que é a formulação de Janssen para as pressões verticais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho propõe a análise de pressões de silos, realizando, inicialmente, uma investigação teórica das pressões exercidas por produtos armazenados em silos metálicos cilíndricos, objetivando a análise dos conceitos e métodos de cálculo. Sendo estruturada nas seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica, sendo abordados conceituação de silos, aplicações, as principais teorias e norma australiana AS3774 (AS, 1996) para realização dos cálculos. Com a revisão bibliográfica pode-se fazer uma análise das diversas teorias de cálculo, em especial a norma australiana AS3774 (AS, 1996), comparando os conceitos e formulações propostas de cada um.
- Desenvolvimento de um *software* utilizando a Linguagem de Programação *Object Pascal*. Para o armazenamento dos dados foi utilizado um sistema de banco de dados compatível com o padrão SQL-ANSI.

3.1 Software desenvolvido

Para o cálculo das pressões foi desenvolvido um *software* com o uso do Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE¹) conhecido como *Lazarus*, que permite o desenvolvimento utilizando-se a linguagem de programação conhecida como *Object Pascal* (CANTU, 2005), uma extensão da Linguagem Pascal. O *Lazarus* é um ambiente de desenvolvimento integrado, que visa à maior produtividade dos desenvolvedores. A principal vantagem de uso dessa IDE é o

1 Um ambiente de desenvolvimento integrado ou Integrated Development Environment (IDE) é um ambiente dotado de conjunto de ferramentas e características que auxiliam e agilizam o processo de desenvolvimento de softwares.

fato de ser gratuita. O *Lazarus* utiliza como compilador o *Free Pascal* (também gratuito), apresentando, ainda, as seguintes vantagens:

- Desenvolvimento multiplataforma: com suporte aos sistemas operacionais: MS-Windows, Linux, MacOS e outros.
- Editor de código fonte com auto-completação e refatoração.
- Depurador com diversas possibilidades de depuração.
- Editor visual de formulários.
- Possui uma extensa biblioteca de componentes chamada de *Lazarus Component Library* (LCL) altamente compatível com a biblioteca de componentes do *Borland Delphi*.
- Possui ferramentas para conversão de código em *Borland Delphi* para *Lazarus*.
- Possibilidade de instalação de diversos componentes.

Para o armazenamento dos dados, foi utilizado um gerenciador de banco de dados compatível com o padrão SQL-ANSI, conhecido como *SQLite*. A principal vantagem do *SQLite* está em sua instalação, não sendo necessário nenhum procedimento complexo, facilitando, assim, o uso do *software* proposto neste trabalho. Outra grande vantagem é a de que o *SQLite* é de uso gratuito, independe do pagamento de licença para seu uso.

Todas as ferramentas utilizadas para o desenvolvimento do *software* utilizado neste trabalho estão disponíveis para uso gratuito, ou seja, o uso destas ferramentas não contraria nenhuma legislação de direitos autorais ou a legislação de *software* vigente no país.

3.1.1 Visão geral do software

O software foi desenvolvido de forma que o usuário precise acessar o menor número de telas para realizar a tarefa desejada. Na tela principal do software é mostrado uma barra de menu em que constam as opções disponíveis:

Projeto: Momento em que o usuário poderá acessar os cálculos das pressões, gerando ou não relatórios e memorial de cálculos.

Cadastro: Permite acesso às telas de cadastro de produtos, das características do silo e de usuários do sistema.

Ajuda: Apresenta informações sobre o uso geral do *software* e dados dos desenvolvedores.

Sair: Encerra o *software*.

A tela de Cadastro de Produtos permite que sejam entradas de forma simples as propriedades físicas dos produtos necessárias para o cálculo de pressões.

A tela Cadastro de Silo permite a entrada das informações básicas sobre a estrutura construtiva do silo.

A tela Cadastro de Usuários permite a entrada de informações básicas sobre o responsável pelo projeto.

Em Projeto/Cálculos são apresentadas as pressões de acordo com o produto e silo escolhido.

Em Projeto/Relatório é possível imprimir as informações sobre os cálculos, inclusive com os dados do responsável pelo projeto.

Propriedades Físicas dos Produtos Armazenados

Produto:

Peso Unitário (KN/m³) - γ

Médio:

Superior:

Ângulo de repouso ϕ_r : (graus)

Efetivo ângulo de atrito interno ϕ_i (graus)

Inferior:

Superior:

Ângulo de atrito com a parede ϕ_w (graus)

Parede Tipo D1: Inferior:
Superior:

Parede Tipo D2: Inferior:
Superior:

Parede Tipo D3: Inferior:
Superior:

Multiplicador Pressão Vertical:

Figura 17 Tela de cadastro das propriedades físicas dos produtos

Projeto de Silo

Características do Silo

Identificação do Projeto: Silo Alto

Altura Total (h+h0): Altura Efetiva (h):

Diâmetro: Seção Transversal:

Rugosidade da Parede:

Figura 18 Tela projeto de silo

Cálculo de Pressões

Rugosidade da Parede: D1 - Polido

Altura do Silo: 10 Diâmetro do Silo: 2

Silo Esbelto

Produto: Açúcar

γ : 8 ϕ_w : 15

ϕ_i : 33 μ : 0,268

Anterior Próximo

AS3774

Z= 0,50 K= 0,35

Pv(z)= 4

Ph(z)= 1,336

Pw(z)= 0,358

Gerar Arquivo Voltar à Tela Anterior

Figura 19 Tela cálculo de pressões

3.1.2 O banco de dados

O banco de dados desenvolvido para essa aplicação consta de duas tabelas principais que permitem o armazenamento das características físicas dos produtos armazenados e das características construtivas do silo.

Os valores de pressões obtidos por meio do software não são armazenados, pois, podem ser gerados, facilmente, a qualquer momento por intermédio das funcionalidades do sistema.

3.1.3 Funções de cálculo de pressões

Foram criadas diversas funções para simplificar o desenvolvimento do software, as quais são listadas no Apêndice A.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados a seguir foram obtidos por meio do programa computacional apresentado anteriormente. São mostrados os resultados de pressão horizontal, vertical e de atrito com a parede para silos baixos com superfície polida e silos esbeltos com superfície rugosa.

Tabela 9 Resultado da Pressão Horizontal – Silos baixos / Superfície Polida

Profundi- dade (m)	Produto / Pressão (KPa)					
	Farinha (de trigo)	Cevada	Cimento	Milho	Trigo	Açúcar
1	2,19	2,36	4,33	2,36	2,53	2,7
2	4,23	4,55	8,23	4,55	4,88	5,2
3	6,11	6,58	11,76	6,58	7,05	7,52
4	7,86	8,47	14,95	8,47	9,07	9,68
5	9,49	10,21	17,83	10,21	10,94	11,67
6	10,99	11,84	20,24	11,84	12,68	13,53
7	12,39	13,34	22,77	13,34	14,25	15,25

Tabela 10 Resultado da Pressão Vertical – Silos baixos / Superfície Polida

Profundi- dade (m)	Produto / Pressão (KPa)					
	Farinha (de trigo)	Cevada	Cimento	Milho	Trigo	Açúcar
1	6,5	7	13	7	7,5	8
2	13	14	26	14	15	16
3	19,5	21	39	21	22,5	24
4	26	28	52	28	30	32
5	32,5	35	65	35	37,5	40
6	39	42	78	42	45	48
7	45,5	49	91	49	52,5	56

Tabela 11 Resultado da Pressão de Atrito com a parede-Silos baixos/Superfície Polida

Profundidade (m)	Produto / Pressão (KPa)					
	Farinha (de trigo)	Cevada	Cimento	Milho	Trigo	Açúcar
1	0,587	0,632	1,574	0,632	0,678	0,723
2	1,132	1,219	2,996	1,219	1,306	1,393
3	1,637	1,764	4,281	1,764	1,890	2,016
4	2,106	2,268	5,440	2,268	2,430	2,593
5	2,541	2,737	6,488	2,737	2,932	3,128
6	2,945	3,172	7,433	3,172	3,398	3,625
7	3,319	3,357	8,288	3,575	3,830	4,085

Tabela 12 Resultado da Pressão Horizontal – Silos Esbeltos / Superfície Rugosa

Profundidade (m)	Produto / Pressão (KPa)					
	Farinha (de trigo)	Cevada	Cimento	Milho	Trigo	Açúcar
2	4,235	4,561	8,387	4,561	4,887	5,213
4	7,899	8,506	15,496	8,506	9,114	9,722
6	11,067	11,919	21,52	11,919	12,77	13,621
8	13,808	14,87	26,626	14,87	15,932	16,995
10	16,179	17,423	30,954	17,423	18,668	19,912
12	18,229	19,632	34,622	19,632	21,034	22,436
14	20,003	21,542	37,73	21,542	23,08	24,619

Tabela 13 Resultado da Pressão Vertical – Silos Esbeltos / Superfície Rugosa

Profundi- dade (m)	Produto / Pressão (KPa)					
	Farinha (de trigo)	Cevada	Cimento	Milho	Trigo	Açúcar
2	13	14	26	14	15	16
4	26	28	52	28	30	32
6	39	42	78	42	45	48
8	52	56	104	56	60	64
10	65	70	130	70	75	80
12	78	84	156	84	90	96
14	91	98	182	98	105	112

Tabela 14 Resultado da Pressão de Atrito com a Parede-Silos Esbeltos/Superfície Rugosa

Profundi- dade (m)	Produto / Pressão (KPa)					
	Farinha (de trigo)	Cevada	Cimento	Milho	Trigo	Açúcar
2	1,975	2,127	4,459	2,127	2,279	2,431
4	3,683	3,966	8,239	3,966	4,25	4,533
6	5,161	5,558	11,442	5,558	5,955	6,352
8	6,439	6,934	14,157	6,934	7,429	7,925
10	7,544	8,124	16,458	8,124	8,705	9,285
12	8,5	9,154	18,409	9,154	9,808	10,462
14	9,328	10,045	20,061	10,045	10,762	11,48

Nas figuras 20,21 e 22 são apresentados os gráficos gerados pelo sistema para as pressões horizontal, vertical e de atrito com a parede, para produtos diversos.

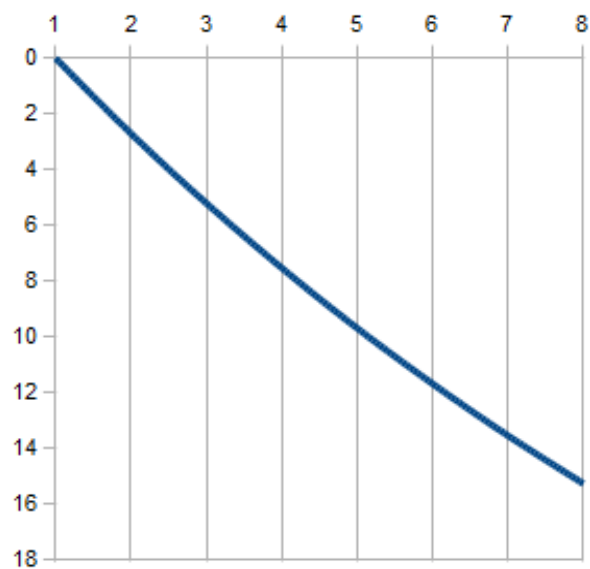


Figura 20 Gráfico da pressão horizontal (Farinha de Trigo / Silo Baixo)

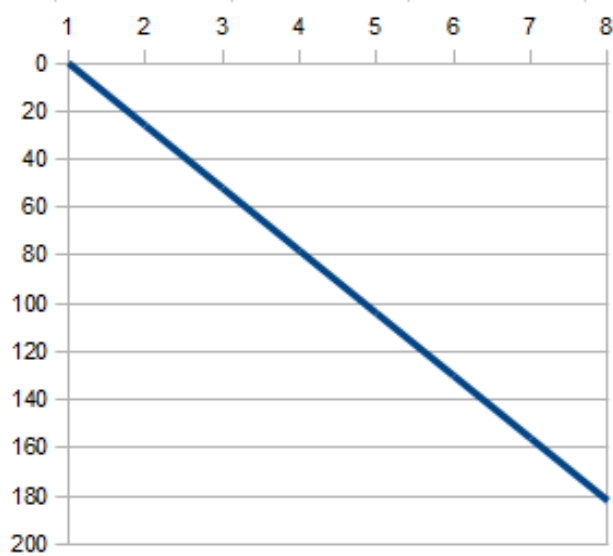


Figura 21 Gráfico da pressão vertical (Cimento / Silo Esbelto)

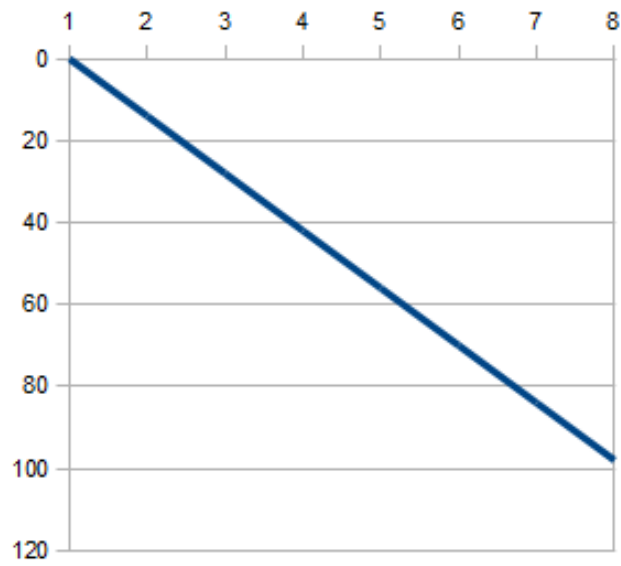


Figura 22 Gráfico da pressão de atrito com a parede (Milho / Silo Esbelto)

5 CONCLUSÕES

Os procedimentos utilizados para os cálculos utilizados no presente trabalho se basearam em uma forma de análise estrutural simples. Com este trabalho foi desenvolvido um software, para cálculo de pressões, tendo como base a norma australiana. Com relação ao cálculo de pressões, é possível que seja feita a variação do produto armazenado, bem como das características do próprio silo (tipo de parede, altura, diâmetro).

O programa computacional que resultou do presente trabalho pode ser aplicado para analisar situações diversas. As características do silo e o produto armazenado são variáveis do programa que fornece como resultado os valores de pressão exercida na estrutura do silo.

O programa computacional se aplica a silos unicelulares e fornece base para futuros desenvolvimentos, permitindo, assim, a análise de estruturas de silos complexos, seja para o armazenamento de produtos agrícolas ou mesmo industrializados.

O presente trabalho apresentou um plano inicial de modelagem de um silo. Para trabalhos futuros, utilizando o software desenvolvido, pode-se realizar uma comparação com valores obtidos, por meio de células de carga instaladas em silos padrão, objetivando o refinamento das formulações utilizadas, garantindo dessa forma valores mais próximos aos da realidade brasileira.

REFERÊNCIAS

- ALVES, V. **Análise e dimensionamento de silos de concreto armado:** desenvolvimento de um programa computacional. 2001. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- ARAÚJO, E. C. **Estudo teórico e experimental de tremonhas piramidais para silos metálicos elevados.** 1997. 317 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1997.
- ARAÚJO, E. C.; CALIL JÚNIOR, C. Silos metálicos cilíndricos: recomendações mínimas de projeto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1995, Viçosa, MG. **Anais...** Viçosa, MG: UFV, 1995. v. 1, p. 131-146.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **TB-374:** silos cilíndricos para grãos vegetais. Rio de Janeiro, 1990a. 6 p.
- _____. **TB-377:** componentes de silos cilíndricos metálicos para grãos vegetais. Rio de Janeiro, 1990b. 7 p.
- AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3774:** loads on bulk containers. Sydney, 1996. 62 p.
- BRANDI, J. L. G. **Previsibilidade e controle de recalques em radiers sobre solo mole.** 2004. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- CALIL JÚNIOR, C. Ações em silos pelo método dos estados limites: proposta de norma brasileira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 16, n. 4, p. 110-117, jun. 1997.

CALIL JÚNIOR, C. **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais**. 1990. 198 f. Tese (Livre Docência em Engenharia Agrícola) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

CALIL JÚNIOR, C.; NASCIMENTO, J. W. B.; ARAÚJO, E. C. **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.

CANTU, M. **Dominando o Delphi 7: a bíblia**. São Paulo: Makron Books, 2005. 799 p.

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

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Relatório da situação da armazenagem no Brasil**. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 20 fev. 2011.

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

ENSTAD, G. **On the theory of arching in mass flow hoppers**. New York: Chemical Engineering Science, 1975. 1283 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 Agrícola) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

GAYLORD JÚNIOR, 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 Agrícola) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

GOMES, F. C.; CALIL JÚNIOR, C. Estudo teórico e experimental das ações em silos horizontais. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 7, n. 24, p. 35-63, 2005.

JENIKE, A. W. **Storage and flow of solids**. Utah: University of Utah, 1964. 197 p. (Bulletin, 123).

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

MILANI, A. P. **Determinação das propriedades de produtos armazenados para o projeto de pressões e fluxo em silos**. 2008. 272 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2008.

NASCIMENTO, F. C. **A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos elevados: o parâmetro K**. 2008. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

NASCIMENTO, J. W. B.; CALIL JÚNIOR, C. Painéis estruturais para paredes de silos verticais prismáticos. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, n. 6, p. 1-21, 1998.

NEGRISOLI, A. A. **Exemplo de uma unidade de armazenamento de cereais**. São Paulo: ENGESILOS, 1997.

_____. **Silos**. São Paulo: ENGESILOS, 1995.

PALMA, G. **Pressões e fluxo em silos esbeltos ($h/d \geq 1,5$)**. 2005. 109 p.
Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Carlos,
2005.

PRESCOTT, J. K.; BARNUM, R. A. **On power flowability**. London:
Pharmaceutical Technology, 2000.

RAVENET, J. The development of industrial silos throughout the world during
the last 100 years. **Bulk Solids Handling**, Clausthal, v. 3, n. 1, p. 127-140, Mar.
1983.

SILVA, F. S. **Propriedades físicas dos grãos de café como subsídio em
projetos de equipamentos e de silos utilizando a metodologia de Jenike**.
2003. 117 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal
de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

SILVA, M. C. A. T. **Estudo da variabilidade pressões em silos**. 1993. 192 f.
Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade de São Paulo, São
Paulo, 1993.

TEIXEIRA, L. G. R. **Determinação das propriedades físicas e de fluxo do
café para projeto estrutural de silos e equipamentos**. 2006. 122 p.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de
Lavras, Lavras, 2006.

WALTERS, J. K. A theoretical analysis of stresses in axially-symmetric hoppers
and bunkers. **Chemical Engineering Science**, New York, v. 28, p. 779-789,
1973.

APENDICE

Apêndice A - Funções utilizadas para realização dos cálculos no software desenvolvido.

Quadro 01 – Função para cálculo de K conforme Palma (2005)

```
function TfrmPressoes.calc_KACI(FIi: double): double;
var
k : double;
begin
k := (1-sin(FIi*pi/180))/(1+sin(FIi*pi/180));
Result := Arredondar(k,3);
end; // Fim calcula K Palma(2005)
```

Quadro 02 - Função para cálculo de K conforme norma AS3774 (AS, 1996)

```
function TfrmPressoes.calc_KAS(localFII, localFIW,localMI: double): double;
var
localK, sen2FI,cos2Fi,raiz,k1,k0 : real;
begin
localFII := Sqlite3Dataset2.FieldByName('effec_low').AsFloat;
localFIW := Sqlite3Dataset2.FieldByName('wd1_low').AsFloat;
localMI := Tan(localFIW*pi/180);
sen2fi := power(sin(localFII*pi/180),2);
cos2fi := power(cos(localFII*pi/180),2);
raiz := 2*sen2fi - power(localMI,2)*cos2fi;
if ( raiz < 0 ) then
begin
localK := -1;
end
else
begin
raiz := sqrt(raiz);
k0 := 1 + sen2fi - (2*raiz);
k1 := 4*power(localMI,2)+cos2fi;
localK := (k0)/(k1);
end;
if ( localK < 0.35 ) then
begin
localK := 0.35;
end;
Result := Arredondar(localK,3);
end; // Fim calcula K AS3774
```

Quadro 03 - Função para cálculo de K conforme Freitas (2001)

```
function TfrmPressoes.calc_KEF(FIi: double): double;
var
k : double;
begin
k := (1-power(sin(FIi*pi/180),2))/(1+power(sin(FIi*pi/180),2));
Result := Arredondar(k,3);
end; // Fim calcula K Freitas
```

Quadro 04 - Função para cálculo da Pressão Horizontal, segundo Freitas (2001)

```
function TfrmPressoes.calc_PHEF(K,peso,profundidade: double): double;
var
ph: double;
begin
ph := K * peso * profundidade;
Result := Arredondar(ph,3);
```

Quadro 05 - Função para cálculo da Pressão Horizontal, para a norma AS3774 (AS, 1996)

```
function TfrmPressoes.calc_PHAS(peso,mi,diametro,profundidade,K: double): double;
var
ph,localA,LocalP : double;
begin
localA := pi*power((diametro/2),2);
localP := 2*pi*(diametro/2);
ph := (peso/mi)*(localA/localP)*(1-exp(-profundidade*K*mi*(localP/localA)));
Result := Arredondar(ph,3);
end; // Fim P Horizontal AS3774/ACI
```

Quadro 06 - Cálculo da Pressão de Atrito com a Parede, para a norma AS3774 (AS, 1996) e Freitas (2001)

```
localPw := localPhz * localMI; // AS3774
localPwACI := localPhzACI*localMI; // ACI313
localPwEF := ((0.8*tan(localFII*pi/180))+0.2*tan(localFIW*pi/180)) * localKEF *
localuw * localProf; // Freitas (2001)
```

Quadro 07 – Função para cálculo da Pressão Vertical, para a norma AS3774 (AS, 1996)

```
function TfrmPressoes.calc_PVFSAS(x,d,peso,altura: double): double;  
var  
pvf,pvi : double;  
begin  
pvi := peso*altura;  
Result := Arredondar(pvi,3);  
end; // Fim P Vert Fundo Silo AS3774
```

Quadro 08 – Função para cálculo da Pressão Vertical, para Freitas (2001)

```
function TfrmPressoes.calc_PVEF(peso,altura,x,diametro: double): double;  
var  
pvf,pv : double;  
begin  
pv := peso*altura*(1-0.9*power(x/diametro,2));  
Result := Arredondar(pv,3);  
end; // Fim P Vert Silo Freitas
```