

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES
FÍSICAS E DE FLUXO DO CAFÉ PARA
PROJETO ESTRUTURAL DE SILOS E
EQUIPAMENTOS**

LUIZ GUSTAVO DOS REIS TEIXEIRA

2006

LUIZ GUSTAVO DOS REIS TEIXEIRA

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E DE FLUXO DO
CAFÉ PARA PROJETO ESTRUTURAL DE SILOS E EQUIPAMENTOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de Concentração Construções Rurais e Ambiente, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

2006

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

Teixeira, Luiz Gustavo dos Reis

Determinação das propriedades físicas e de fluxo do café para projeto estrutural de silos e equipamentos / Luiz Gustavo dos Reis Teixeira.- Lavras : UFLA, 2006.

104 p. : il.

Orientador: Francisco Carlos Gomes.

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Propriedades físicas. 2. Propriedades de fluxo. 3. Café. 4. Silos. I. Universidade Federal e Lavras. II. Título.

CDD-633.20868

LUIZ GUSTAVO DOS REIS TEIXEIRA

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E DE FLUXO DO
CAFÉ PARA PROJETO ESTRUTURAL DE SILOS E EQUIPAMENTOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração construções rurais e ambiência, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 11 de julho de 2006

Prof. Dr. Stélio Maia Menezes DEG/UFLA

Prof. Dr. Evandro de Castro Melo DEA/UFV

Prof. Dr. Tadayuki Yanagi Junior DEG/UFLA

Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes

DEG/UFLA

(Orientador)

LAVRAS

MINAS GERAIS - BRASIL

À minha família,
Aos meus amigos,
OFEREÇO.

Aos meus pais, José Hugo e Maria Catarina,
Ao meu irmão Sérgio Henrique,
Ao meu sobrinho Gabriel e
À minha noiva Gizele
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço

Aos meus pais, pela educação e apoio;

A minha noiva Gizele pela paciência, amizade e companheirismo;

Aos meus familiares, em especial minhas avós.

Aos meus amigos,

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Departamento de Engenharia, pela oportunidade de realização do mestrado.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Francisco Carlos Gomes, pelo apoio, confiança, conhecimentos adquiridos, orientação e amizade durante a graduação e mestrado.

BIOGRAFIA

Luiz Gustavo dos Reis Teixeira, filho de José Hugo de Paiva Teixeira e Maria Catarina dos Reis Teixeira nasceu em 06 de agosto de 1981, na cidade de Natércia, estado de Minas Gerais.

Graduou-se Engenheiro Agrícola pela Universidade Federal de Lavras em julho de 2004. Foi bolsista do grupo PET - Programa Especial de Treinamento - de outubro de 2000 a julho de 2001, onde trabalhava em organizações de cursos e eventos para os estudantes de Engenharia Agrícola. Em agosto de 2001, iniciou como bolsista de iniciação científica do PIBIC/CNPq, primeiramente com trabalhos voltados para a área de determinação de propriedades físicas de produtos armazenados. Em julho de 2003, ainda como bolsista do PIBIC/CNPq, foi orientado em um projeto de avaliação da resistência de placas de solo-cimento, durando até julho de 2004.

Ingressou no mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração construções rurais e ambiência, em janeiro de 2005.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS	v
RESUMO.....	vii
ABSTRACT	viii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1 O produto café.....	3
2.1.1 Constituição e processamento do grão de café.....	3
2.1.2 Armazenamento de café.....	6
2.2 Estruturas de armazenamento nas cadeias agroindustriais.....	6
2.2.1 Armazenamento convencional.....	8
2.2.2 Armazenamento a granel.....	8
2.3 Considerações para projeto estrutural de silos.....	11
2.3.1 Propriedades físicas e de fluxo dos produtos armazenados.....	11
2.3.1.1 Peso específico.....	12
2.3.1.2 Granulometria.....	13
2.3.1.3 Produto armazenado e lugar geométrico.....	14
2.3.1.4 Fator fluxo da tremonha (ff).....	23
2.3.1.5 Ângulo de repouso (ϕ_r).....	24
2.3.2 Fluxo em silos.....	25
2.3.2.1 Obstruções do fluxo.....	28
2.3.2.2 Requisitos para evitar obstruções de fluxo.....	29
2.3.2.3 Tremonha.....	33
2.3.3 Ações em silos.....	41
2.3.3.1 Ações devido ao produto armazenado.....	42
2.3.3.2 Teoria de JANSSEN.....	45
2.3.3.3 Pressões em silos segundo a norma DIN 1055 (1987).....	48
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	58
3.1 Determinação das propriedades físicas do café com pergaminho.....	58
3.1.1 Determinação do ângulo de atrito interno (ϕ_i) e do efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e).....	59
3.1.2 Determinação do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno com o tempo de consolidação.....	66
3.1.3 Determinação do ângulo de atrito com a parede.....	68
3.1.4 Determinação do ângulo de repouso.....	71
3.1.5 Determinação estatística dos valores limites inferior e superior das propriedades.....	72
3.2 Análise do fluxo do produto em silos protótipos.....	73

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	76
4.1 Propriedades físicas do café.....	76
4.2 Análise de fluxo em silos protótipos.....	82
4.2.1 Protótipo de seção quadrada	82
4.2.2 Silo modelo com seção circular	87
5 CONCLUSÃO	93
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
7 ANEXOS	96
7.1 Anexo 1: projeto dos silos protótipos	96
7.2 Anexo 2: Exemplo de determinação do ângulo de atrito interno (ϕ_i) e do efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)	98
7.3 Anexo 3: Recomendações para o projeto de silos para o café cereja descascado	101
8 GLOSSÁRIO.....	104

LISTA DE FIGURAS

FIGURA - 1 Componentes do fruto do cafeeiro.....	3
FIGURA - 2 Fluxograma do beneficiamento de café.....	5
FIGURA - 3 Silos Verticais.....	10
FIGURA - 4 Silos Horizontais.....	10
FIGURA - 5 Célula de cisalhamento de Jenike.....	15
FIGURA - 6 Lugar geométrico de deslizamento.....	16
FIGURA - 7 Lugar geométrico de deslizamento.....	17
FIGURA - 8 Bancada de consolidação.....	18
FIGURA - 9 Efeito do tempo de consolidação no lugar geométrico de deslizamento.....	19
FIGURA - 10 Função fluxo (FF), para diferentes produtos.....	20
FIGURA - 11 Função fluxo instantânea e função fluxo com o tempo de consolidação.....	21
FIGURA - 12 Detalhe da célula de cisalhamento para determinação do ângulo de atrito com a parede (ϕ_w).....	22
FIGURA - 13 Lugar geométrico de deslizamento com a parede.....	23
FIGURA - 14 Representação da tensão (σ_1') atuando em um arco estável.....	24
FIGURA - 15 Fluxo de massa.....	25
FIGURA - 16 Fluxo de funil.....	26
FIGURA - 17 Determinação do tipo de fluxo.....	27
FIGURA - 18 Determinação do tipo de fluxo.....	27
FIGURA - 19 Obstruções do fluxo em silos.....	28
FIGURA - 20 Análise para a não formação de arcos.....	30
FIGURA - 21 Critério do fluxo ou não fluxo.....	31
FIGURA - 22 Formas de tremonha.....	33
FIGURA - 23 Diagrama para determinação da inclinação das tremonhas.....	34
FIGURA - 24 Gráfico para a determinação do fator fluxo da tremonha.....	36
FIGURA - 25 Determinação da função $H(\alpha)$ para tremonhas cônicas e em cunha.....	38
FIGURA - 26 Fator de tubo $G(\phi)$	40
FIGURA - 27 Pressões na parede do silo em função dos ciclos de carregamento, armazenamento e descarga.....	42
FIGURA - 28 Pressões hidrostáticas.....	43
FIGURA - 29 Pressões atuantes em um silo.....	44
FIGURA - 30 Forças agindo sobre uma camada infinitesimal.....	46
FIGURA - 31 Ocorrência de sobrepressão em silos de fluxo de funil.....	50
FIGURA - 32 Raio (r) do silo e espessura (t) da parede do silo.....	51
FIGURA - 33 Área de sobrepressão.....	52
FIGURA - 34 Localização das sobrepressões em silos com fluxo de massa.....	54

FIGURA - 35 Pressão normal às paredes devido ao produto dentro da tremonha.	56
FIGURA 36 - Pressão normal devido ao produto sobre a tremonha.	57
FIGURA 37 - Equipamento de cisalhamento TSG 70-140.	59
FIGURA 38 - Detalhe (a) da etapa de acomodação da amostra e (b) da célula de cisalhamento	61
FIGURA 39 - Detalhe da etapa de pré-cisalhamento ou cisalhamento.	62
FIGURA 40 - Foto (a) do registrador da força cisalhante e (b) do gráfico gerado pelo registrador	63
FIGURA 41 - Dados de entrada do programa Yield locus.	66
FIGURA 42 - Bancada de consolidação.....	67
FIGURA 43 - Determinação do ângulo de atrito com a parede.....	68
FIGURA 44 - Diferentes materiais para confecção da parede do silo.....	68
FIGURA 45 - Força registrada para cisalhar a amostra nos ensaios de cisalhamento com a parede	69
FIGURA 46 - Dados de entrada no programa yield locus para a determinação do Ângulo de atrito com a parede.....	70
FIGURA 47 - Aparelho utilizado para a determinação do ângulo de repouso. ..	71
FIGURA 48 - Gráfico de caixas.	72
FIGURA 49 - Silos protótipos de acrílico.	73
FIGURA 50 - Preenchimento em camadas para análise do fluxo.	74
FIGURA 51 - Padrão de fluxo conforme a norma DIN 1055.....	82
FIGURA 52 - Indicação de uma região sem fluxo no início da descarga	83
FIGURA 53 - Indicação de uma região sem fluxo no final da descarga	83
FIGURA 54 - Possíveis padrões de fluxo que podem ocorrer na descarga de café de um silo de acrílico com 45° de inclinação da tremonha.	84
FIGURA 55 - Formação de um funil durante a descarga de café do silo protótipo retangular.....	84
FIGURA 56 - Gráfico fluxo ou não fluxo para o silo de acrílico com seção retangular.	86
FIGURA 57 - Possíveis padrões de fluxo que podem ocorrer na descarga de areia de um silo de acrílico com 60° de inclinação da tremonha segundo a norma DIN 1055	87
FIGURA 58 - Indicação da posição do produto no início do fluxo.	88
FIGURA 59 - Indicação da posição do produto durante o fluxo	88
FIGURA 60 - Possíveis padrões de fluxo que podem ocorrer na descarga de areia de um silo de acrílico com 60° de inclinação da tremonha segundo a norma DIN 1055.	89
FIGURA 61 - Caracterização da superfície da massa de grãos no início do fluxo de massa.....	90
FIGURA 62 - Caracterização da superfície da massa de grãos durante o fluxo de massa.....	90

FIGURA 63 - Gráfico do fluxo ou não fluxo para o silo de seção circular.	92
FIGURA 64 - Registro das forças cisalhantes para a determinação do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno.....	98
FIGURA 65 - Preenchimento do programa Yield locus para a seqüência de carregamento 100 N de pré-cisalhamento e 70 N de cisalhamento.	99
FIGURA 66 - Gráfico tensão normal (σ) por tensão cisalhante (τ) para o exemplo determinado.....	100
FIGURA 67 - Exemplo de disposição de silos multicelulares.....	103

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 Limites apropriados para as propriedades físicas.....	12
TABELA 2 Coeficiente de sobrepressão segundo a norma DIN 1055.....	49
TABELA 3 Seqüência de carregamento para a determinação do efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) e do ângulo de atrito interno (ϕ_i) (Milani, 1993):	64
TABELA 4 Seqüência de carregamento para a determinação do efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) e do ângulo de atrito interno (ϕ_i) (Haaker, 1999);	65
TABELA 5 Rugosidade aparente dos materiais utilizados para a determinação dos ângulos de atrito com a parede (ϕ_w):	70
TABELA 6 Resultados obtidos dos ângulos de atrito interno (ϕ_i) e efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) para os diferentes carregamentos nas diferentes repetições:	77
TABELA 7 Resultados obtidos dos ângulos de atrito interno (ϕ_i) e efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) para os diferentes carregamentos e tempos de consolidação.....	79
TABELA 8 Resultados determinados para o ângulo de atrito do café cereja descascado com diferentes materiais para a parede do silo.	80
TABELA 9 Valores determinados para o ângulo de repouso (ϕ_r).....	81

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ_i	- Ângulo de atrito interno
ϕ_e	- Efetivo ângulo de atrito interno
ϕ_w	- Ângulo e atrito com a parede
ϕ_{es}	- Valor superior do efetivo ângulo de atrito interno
ϕ_{ws}	- Valor superior do ângulo de atrito com a parede
ϕ_r	- Ângulo de repouso
P	- Densidade do produto
γ	- Peso específico
FF	- Função fluxo do produto
FF _t	- Função fluxo com o tempo de consolidação
<i>ff</i>	- Fator fluxo da tremonha
σ_{pre}	- Tensão normal à célula de cisalhamento na etapa de pré-cisalhamento
σ_s	- Tensão normal à célula de cisalhamento na etapa de cisalhamento
σ_1	- Tensão de consolidação
σ_c	- Tensão inconfiada de ruptura
σ_1'	- Tensão atuante em um arco estável imaginário
σ_w	- Tensão normal à célula de cisalhamento nos ensaios para a determinação do ângulo de atrito com a parede
σ_{crit}	- Tensão crítica para a ocorrência do fluxo
τ_{pre}	- Tensão cisalhante na etapa de pré-cisalhamento
τ_s	- Tensão cisalhante na etapa de cisalhamento
τ_w	- Tensão cisalhante no ensaio para a determinação do ângulo de atrito com a parede
μ'	- Coeficiente de atrito com a parede
α	- Inclinação da tremonha
α_{crit}	- Inclinação máxima da tremonha para ocorrência do fluxo de massa

d_f	- Índice utilizado no gráfico de caixas para a determinação dos limites inferiores e superiores
L	- Maior dimensão da boca de descarga retangular
b_{\min}	- Menor dimensão da boca de descarga
$G(\phi_i)$	- Fator de tubo
P	- Carga de cisalhamento
P_{pre}	- Carga de pré-cisalhamento
P_h	- Pressão horizontal
P_v	- Pressão vertical
P_w	- Pressão de atrito com a parede no corpo do silo
P_n	- Pressão normal à parede da tremonha
P_t	- Pressão de atrito na parede da tremonha
K	- Índice K
P_{hd}	- Pressão horizontal de descarga
P_{hc}	- Pressão horizontal de carregamento
P_{wd}	- Pressão de atrito de descarga
P_{wc}	- Pressão de atrito de carregamento
C	- Coeficiente de sobrepressão
r	- Raio do silo
D	- Diâmetro do silo
t	- Espessura da parede do silo
β_h	- Coeficiente de esbeltez do silo
β_a	- Coeficiente de excentricidade do silo
β_r	- Coeficiente de rigidez do silo
S_p	- Força de pré-cisalhamento
S_s	- Força de cisalhamento
W_t	- Peso total da célula de cisalhamento
W_s	- Carregamento normal à célula e cisalhamento

RESUMO

TEIXEIRA, Luiz Gustavo dos Reis. **Determinação das propriedades físicas e de fluxo do café para projeto estrutural de silos e equipamentos.** 2006. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.*

O armazenamento do café é uma das etapas do processo produtivo que, quando não conduzida de forma adequada, contribui para uma grande parcela das perdas da produção. Um dos fatores que favorecem a melhoria dos sistemas de armazenamento é a elaboração de projetos estruturais de silos ou armazéns. Para que os produtores ou agroindústrias possam escolher a melhor maneira de armazenar seu café é necessário o conhecimento das propriedades físicas dos produtos armazenados. Seu conhecimento é de fundamental importância na avaliação estrutural da unidade, tomando como base o cálculo das pressões que irão ocorrer na parede do silo, assim como o padrão de fluxo na descarga do produto. Este trabalho foi desenvolvido com intuito de se determinarem as propriedades físicas do café do tipo cereja descascado, dando subsídio aos projetos de uma estrutura de armazenamento e equipamentos usados no beneficiamento do produto, além de avaliar o fluxo ocorrido durante a descarga, para diferentes materiais de confecção do silo. O trabalho foi desenvolvido na Universidade Federal de Lavras e na Escola de Engenharia de São Carlos. Foi utilizada, para determinar o ângulo de atrito interno e o ângulo de atrito com a parede, a máquina de cisalhamento de Jenike. Para a avaliação do fluxo foram construídos dois modelos reduzidos, confeccionados em acrílico, um de seção retangular e outro de seção circular. Dos ensaios realizados, foram obtidos os seguintes valores das propriedades estudadas: 27° e 36° para os limites inferior e superior do ângulo de atrito interno e 31° e 40° para o efetivo ângulo de atrito interno, nos ensaios instantâneos. Para os ensaios com o tempo de consolidação foram determinados os limites para o ângulo de atrito interno de 32°, 37° para 6 horas de consolidação; 31°, 37° para 12 horas de consolidação e 28° e 36° para 48 horas de consolidação. Os valores limites encontrados para o efetivo ângulo de atrito interno com o tempo de consolidação foram 36° e 39° com 6 horas de consolidação; 33° e 41° com 12 horas de consolidação e 32° e 42° com 48 horas de consolidação. Os valores encontrados para a função fluxo caracterizam o café como um produto que flui facilmente. Entretanto, apresenta a possibilidade de ocorrência de obstruções no fluxo, com o tempo de consolidação, durante o armazenamento.

* Orientador: Francisco Carlos Gomes - UFLA

ABSTRACT

TEIXEIRA, Luiz Gustavo dos Reis. **Determination of the physical and flow properties of the coffee for structural project of silos and equipments.** 2006. 104 p. Dissertation (Master in Agricultural Engineering) – Universidade Federal de Lavras. Lavras, MG.

The storage of coffee is one of the productive process stages that, when not led by right form, contributes for a great portion of the losses of the production. One of the factors that favours the improvement of the storage systems is the elaboration of structural projects of silos. In order to the producers can choose the best way to store your coffee, it is necessary the knowledge of the physical properties of the stored products. Your knowledge has a fundamental importance in the structural evaluation of the unit, taking as base the calculation of the pressures that will be happen in the wall of the silo, as well as the flow pattern in the discharge of the product. This work was developed with the intention of being determined the physical properties of the coffee, giving subsidy to the projects of a storage structure and equipments used in the improvement of the product, besides evaluating the flow happened during the discharge, for different materials of making of the silo. The work was developed in the Federal University of Lavras and in the School of Engineering of São Carlos. It was used to determine the angle of internal attrition and the attrition angle with the wall the Jenike Shear machine. For the evaluation of the flow two reduced models were built made in acrylic, one of rectangular section and another of circular section. Of the accomplished assays, they were obtained the following values of the studied properties: 27° and 36° for the limits inferior and superior of the angle of internal attrition and 31° and 40° for the cash angle of internal attrition in the instantaneous rehearsals; For the assays with the time of consolidation were determined the limits for the angle of internal attrition of 32°, 37° for 6 hours of consolidation; 31°, 37° for 12 hours of consolidation and 28° and 36° for 48 hours of consolidation. The values limits found for the cash angle of internal attrition with the time of consolidation were 36° and 39° with 6 hours of consolidation; 33° and 41° with 12 hours of consolidation and 32° and 42° with 48 hours of consolidation. The values found for the flow function characterize the coffee as a product that flows easily. However, it presents the possibility of occurrence of obstructions in the flow with the time of consolidation during the storage.

1 INTRODUÇÃO

A cadeia agroindustrial do café vem passando por um processo de modernização do processo produtivo. Isto devido à necessidade de se aumentar a produtividade e melhorar a qualidade para atender o crescente mercado de cafés especiais. Dentro deste contexto, é importante destacar o armazenamento do produto, uma vez que a utilização de técnicas adequadas pode reduzir custos e diminuir possíveis perdas da produção.

O armazenamento do café, seja ele natural seco, despulpado ou desmucilado, vem sendo feito principalmente no sistema convencional, ou seja, em sacaria. Um sistema bastante utilizado em outras culturas, mas ainda incipiente no armazenamento de café, é a granelização do produto. Este sistema, além de reduzir os custos com mão de obra e sacarias, possibilita um melhor aproveitamento da área instalada e ainda um aumento da capacidade armazenadora, próximo aos centros consumidores.

Entretanto, para que o café possa ser granelizado, é necessária a utilização de silos especialmente dimensionados para este propósito. Na elaboração do projeto da estrutura, o conhecimento das propriedades físicas do produto, que irá se armazenar, é fundamental. Tais propriedades interferem diretamente nas pressões que ocorrerão nas paredes e no fundo do silo. Juntamente com as propriedades geométricas da estrutura, as propriedades físicas do produto também definem o padrão de fluxo que irá ocorrer na descarga do silo.

Dentre as formas de processamento de café, um produto que vem ganhando destaque é o café descascado. O objetivo deste trabalho foi determinar as propriedades físicas e de fluxo que são consideradas ou determinantes como parâmetros no projeto de silos, sendo elas: ângulo de atrito interno (ϕ_i), efetivo

ângulo de atrito interno (ϕ_e), ângulo de repouso (ϕ_r), ângulo de atrito do produto com o material da parede do silo (ϕ_w) e a função fluxo do produto (FF).

Utilizando as propriedades determinadas, foi possível fazer uma análise do fluxo do produto em silos protótipos, comparando os resultados obtidos com as recomendações da norma alemã (DIN 1055).

Este trabalho tem o intuito de orientar engenheiros, pesquisadores e projetistas no desenvolvimento de silos e equipamentos, tomando como parâmetro as propriedades físicas do café cereja descascado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O produto café

Para sugerir qualquer sistema de armazenamento para o produto café é necessário conhecer suas propriedades, tanto físicas e mecânicas, analisando não somente a constituição do fruto, como também os métodos de processamento usados, uma vez que tais métodos resultam em produtos com características físicas distintas.

Deve-se ressaltar que os métodos de processamento e armazenamento do produto café têm passado por constante evolução, o que repercute na qualidade do mesmo.

2.1.1 Constituição e processamento do grão de café

O fruto do cafeeiro é composto pelo grão propriamente dito, que é envolvido pelo pergaminho, pela polpa e pela casca, conforme mostrado na Figura 1.

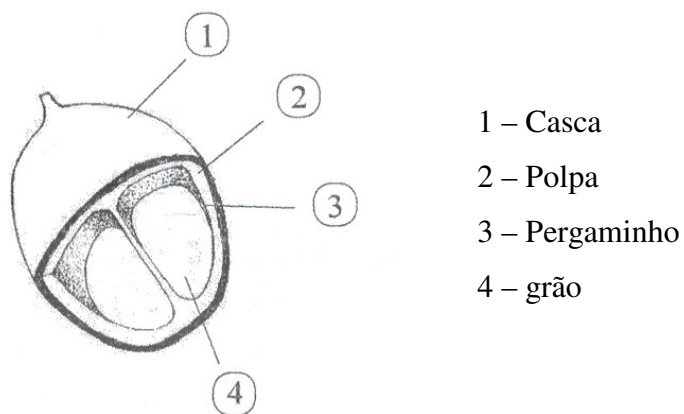


FIGURA - 1 Componentes do fruto do cafeeiro.

A operação de colheita inicia-se quando os frutos do cafeeiro apresentam-se em estado de maturação. Entretanto, devido ao amadurecimento desuniforme, são colhidos conjuntamente maduros (cerejas), verdes e os que já passaram do ponto de maturação.

Logo após ser colhido, o café passa por uma série de etapas que vão definir algumas propriedades, que incidirão não somente no tempo de secagem, como também nas características de armazenamento do produto. Esta etapa é conhecida como processamento do café.

O processamento de café pode ser feito de duas formas: processamento **via seca** e processamento **via úmida**. A segunda opção, além de fazer com que haja a diminuição dos custos com a secagem, de maneira geral, proporciona um fruto de melhor bebida.

O processamento via seca consiste em secar o fruto ainda com a polpa e a casca. Neste sistema são secos produtos com diferentes graus de maturação.

O processamento via úmida tem como finalidade evitar os inconvenientes causados com o processamento via seca, ou seja, a secagem com a massa de grãos com diferentes graus de maturação.

O preparo via úmida consiste no despolpamento do café cereja, ou seja, do café maduro. A despolpa é feita por compressão do fruto entre uma tala de borracha e um rotor com ranhuras. A semente é separada de sua polpa, como se apertassem os frutos maduros entre os dedos.

Existem dois produtos distintos que podem ser obtidos pelo processamento via úmida: café cereja descascado e café cereja despolpado.

No café cereja descascado, há a retirada somente da polpa. O fruto, saindo do despolpador, vai para a secagem ainda com a mucilagem.

No processamento do café cereja despolpado, a mucilagem é removida antes de o produto ir para a secagem, utilizando-se a fermentação natural em tanques ou em máquinas chamadas desmuciladoras.

Um fluxograma mostrando as diferentes etapas do processamento do café pode ser visto na Figura 2:

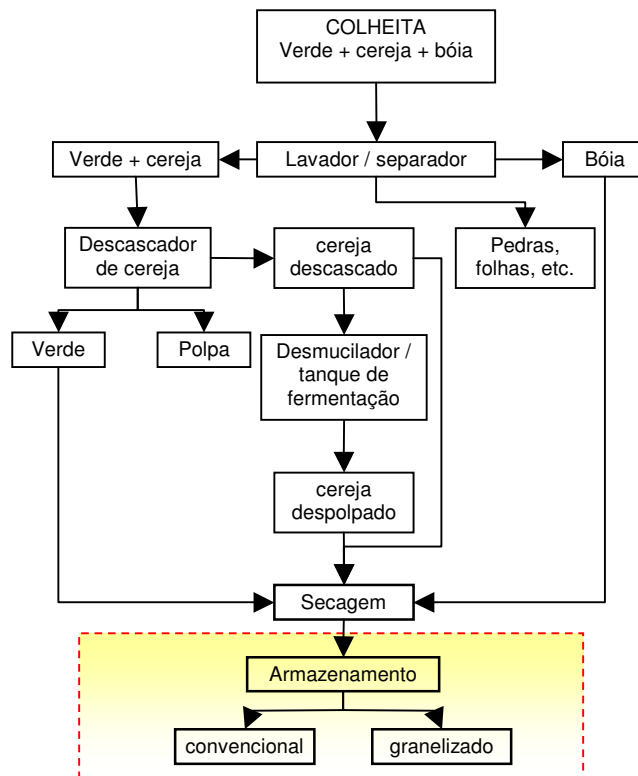


FIGURA - 2 Fluxograma do beneficiamento de caf6.

2.1.2 Armazenamento de café

Embora a qualidade do produto não possa ser melhorada durante o armazenamento, boas condições de armazenagem certamente contribuirão para a conservação de suas propriedades iniciais por um período maior.

Segundo Tosello (1957), o café, seja ele processado via seca ou via úmida, deve ser armazenado a fim de se obter a uniformidade em relação à umidade, conseqüentemente uniformizando também a cor e aspecto, e também para a formação de estoque suficiente, para regularizar a alimentação das máquinas de beneficiamento.

No Brasil, o armazenamento convencional, ou seja, armazenado em sacas, ainda é amplamente utilizado. Entretanto, devido ao crescente aumento no custo de produção de toda a cadeia produtiva, novas alternativas para o armazenamento do café vêm sendo estudadas e implantadas por algumas empresas. Dentre estas alternativas, pode-se destacar a granelização de antigos armazéns convencionais, com a construção de silos verticais no seu interior, aproveitando assim a cobertura original da estrutura e dos BAGS, geralmente utilizados para armazenamento de menor volume de produto.

2.2 Estruturas de armazenamento nas cadeias agroindustriais

O armazenamento dos produtos agrícolas se faz necessário, não só pela conservação do produto, como também pela possibilidade de se aumentar a lucratividade das empresas, uma vez que possibilita a venda de seus produtos em épocas de preços mais favoráveis.

Segundo Silva (1998), o armazenamento no Brasil, até a década de 70, concentrava-se no litoral, sendo feito predominantemente em sacarias. A partir da década de 70, iniciaram-se a interiorização e granelização da rede de armazenamento nacional.

Segundo Gomes (2000), a expansão da rede armazenadora no Brasil se fez pelo aumento das atividades destinadas à conservação dos produtos agrícolas e manutenção dos estoques reguladores, por parte do governo federal.

Uma rede armazenadora é um conjunto de estruturas destinadas a receber a produção de grãos, armazená-los, conservá-los e redistribuí-los. Uma rede armazenadora é composta por unidades de armazenamento, que podem ser classificadas segundo sua localização em:

- Unidade de armazenamento na fazenda. Localizada na propriedade agrícola.
- Unidades coletoras. Localizada próximo às fazendas e presta serviços a vários produtores.
- Unidades intermediárias. São localizadas em pontos estratégicos do sistema viário. Recebem a produção das unidades coletoras e das fazendas e a redistribui.
- Unidades terminais ou sub-terminais. São localizadas nos centros consumidores e nos portos.

Estas unidades de armazenamento são compostas por sistemas de armazenamento, como silos e armazéns.

Existem vários sistemas de armazenamento de produtos agrícolas, entretanto as formas mais comumente encontradas são o armazenamento convencional, em sacarias, e o armazenamento do produto a granel, geralmente feito em estruturas metálicas, de concreto, de alvenaria ou de madeira.

2.2.1 Armazenamento convencional

O armazenamento de grãos em sacos apresenta algumas vantagens:

- Menor investimento inicial;
- Baixo custo das instalações;
- Diferenciação dos produtos em lotes;
- Remoção de sacos com produtos deteriorados, sem a remoção de todo

o produto armazenado;

- Facilita a comercialização em pequena escala.

O armazenamento convencional pode ser feito em:

▪ Armazéns infláveis: São construídos de vinil ou polipropileno e são sustentados por ventiladores.

▪ Armazéns estruturais: É utilizado o mesmo material construtivo dos armazéns infláveis, entretanto sua sustentação é feita por uma estrutura, o que elimina a utilização dos ventiladores.

▪ Armazéns convencionais: São projetados e construídos para uma armazenagem por longos períodos, apresentando características técnicas adequadas. Pode ser feito de alvenaria, estrutura metálica ou mista.

2.2.2 Armazenamento a granel

O armazenamento a granel caracteriza-se pela manipulação e armazenamento de grãos, sem a utilização de sacarias ou outras embalagens. É o sistema mais utilizado entre os produtores de médio e grande porte, cooperativas, unidades coletoras, intermediárias e terminais.

Este sistema de armazenamento apresenta algumas vantagens em relação ao armazenamento convencional:

- Menor espaço por unidade de peso armazenado;
- Mais facilidade para controlar os efeitos da temperatura, umidade, fungos e insetos sobre os grãos;

- Menor custo operacional;

Para o armazenamento são necessários silos especialmente projetados para cada produto.

De acordo com Gomes (2000), os silos podem ser classificados quanto:

- À construção em relação ao solo:
 - Silos elevados
 - Silos não elevados
- À estanqueidade;
 - Silos herméticos
 - Silos não herméticos
- À geometria;
 - Silos baixos
 - Silos de fundo plano (Squat)
 - Silos com tremonha
- Ao sentido em que se desenvolve a estrutura.
 - Silos verticais (Figura 3);
 - Silos horizontais (Figura 4).



FIGURA 3 - Silos Verticais.



FIGURA 4 - Silos Horizontais.

2.3 Considerações para projeto estrutural de silos

Com o intuito de transformar o armazenamento do produto café para o sistema granelizado, é extremamente importante o entendimento dos parâmetros, relacionados com as suas propriedades, utilizados em projeto de silos.

O embasamento teórico das propriedades físicas do produto armazenado e de suas interações com a geometria do silo se fazem necessários para prever o padrão de fluxo que irá ocorrer durante a descarga do produto, as possíveis obstruções no fluxo e quais as pressões que incidirão nas paredes e na tremonha do silo, possibilitando um projeto seguro e econômico da estrutura.

2.3.1 Propriedades físicas e de fluxo dos produtos armazenados

Inicialmente, para o projeto de estruturas de armazenamento a granel, os parâmetros que devem ser levados em consideração são as propriedades físicas e de fluxo dos produtos armazenados.

As propriedades físicas e de fluxo normalmente consideradas são:

- Massa específica (ρ);
- Granulometria;
- Ângulo de repouso (ϕ_r);
- Ângulo de atrito interno (ϕ_i);
- Efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e);
- Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w);
- Função fluxo (FF) e
- Fator fluxo da tremonha (ff).

Nascimento (1996, citado por Silva, 1998) e Calil Jr. et al. (1997), propõem, tendo como referência a norma australiana (Australian Standard, 1996), que para projeto, deverão ser determinados dois limites para cada parâmetro,

sendo estes limites os valores máximo e o mínimo de cada uma das propriedades, obtendo-se a combinação mais desfavorável para cada caso.

Segundo Calil Jr. et al. (1997), a densidade do produto deve ser determinada para o maior valor possível, em condições normais de operação. Para os valores de ângulo de atrito com a parede, efetivo ângulo de atrito interno e a relação entre a pressão horizontal e vertical, fator este que depende do ângulo de atrito interno, o autor recomenda que os valores característicos superiores e inferiores devam ser determinados. A utilização dos valores superiores ou inferiores é dependente da aplicação desejada, como mostrado na Tabela 1.

TABELA 1 - Limites apropriados para as propriedades físicas.

Aplicação da propriedade	Peso específico do produto	Ângulo de atrito com a parede	Relação entre as pressões
Pressão máxima normal na parede	Superior	Inferior	Superior
Força de atrito máxima na parede	Superior	Inferior	Inferior
Pressões máximas na tremonha	Superior	Superior	Superior

Fonte: Adaptado de Calil Jr. et al. (1997)

2.3.1.1 Peso específico

Entende-se por peso específico a massa das partículas sólidas, contidas em um recipiente, dividido pelo volume total deste recipiente e multiplicado pela aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$).

As normas internacionais recomendam que sejam utilizados os valores determinados em laboratório, considerando os valores superiores e inferiores. Caso a determinação em laboratório não seja possível deverão ser utilizados

valores tabelados, multiplicados por 0,75 e 1,25 para a determinação dos valores inferiores e superiores, respectivamente.

Existe, na literatura, uma grande variação nos valores do peso específico de diversos produtos, principalmente quando se refere àqueles que apresentam alta compressibilidade. Alguns métodos de cálculo de pressões, como o de Janssen, e algumas normas, como a alemã e a americana, não prevêm a ocorrência deste fator, o que resulta em valores incorretos de tensões. A previsão da compressibilidade deverá ser feita, uma vez que interfere diretamente nas pressões.

O peso específico de um produto armazenado é função da umidade, das sobrepensões que ocorrem no silo, do tempo de armazenamento e da altura de queda do produto. Canadian farm building code (1983, citado por Gomes, 2000) recomenda que os valores estabelecidos por norma devam ser corrigidos com um acréscimo de 6%.

2.3.1.2 Granulometria

A fluxibilidade de um produto que contenha diferentes granulometrias (partículas finas e grossas) é governada pelas propriedades de fluxo das menores partículas. As partículas mais grossas afetarão a tendência de agrupamento na boca de descarga e o impacto pode causar compactação do produto, ao longo do canal de fluxo.

A análise da granulometria do produto se faz importante no projeto de um silo, uma vez que interfere no fluxo do produto, especialmente no que diz respeito à formação de arcos mecânicos junto à boca de descarga.

Ravenet (1992, citado por Diniz, 2005) classifica as partículas da seguinte forma:

- > 100 mm → partículas grossas

- Entre 30 e 5 mm → partículas granulares
- Entre 5 mm e 100 μm → partículas finas. Dentre deste grupo pode existir coesão
- < 10 μm → Partículas extrafinas.

Calil Jr. (1990) classifica os produtos em função de sua granulometria (D_p):

- $D_p > 1$ mm produtos granulares;
- $0,297 \leq D_p < 1$ mm pulverulentos e/ou pulverulentos coesivos;
- $0,079 \leq D_p < 0,297$ mm produtos pulverulentos coesivos finos;
- $D_p < 0,079$ mm produtos pulverulentos coesivos extrafinos.

2.3.1.3 Produto armazenado e lugar geométrico

Um dos estudos, considerados de maior importância para a determinação das propriedades de fluxo, foi o apresentado por Jenike (1964). Neste trabalho o autor avaliou a aplicabilidade dos equipamentos da mecânica dos solos para a determinação das propriedades de fluxo dos produtos armazenados. Entretanto, devido aos níveis de tensões ocorridos em silos serem inferiores aos níveis que ocorrem em solos, os resultados apresentados não foram satisfatórios. A partir disto, Jenike desenvolveu um aparelho de cisalhamento apropriado para ser utilizado na determinação das propriedades de produtos armazenados em silos. Este aparelho, conhecido internacionalmente como *Jenike shear tester*, tem sido utilizado desde então como aparelho padrão por diversos órgãos normativos, para a determinação das propriedades dos produtos armazenados.

O aparelho de Jenike é composto por uma célula de cisalhamento de forma cilíndrica, dividida em um anel inferior e um superior, um pendural com pesos para a aplicação da força vertical na amostra, um suporte de carga que promove o cisalhamento, uma célula de carga para medir a força de cisalhamento e um registrador para indicação desta força. Na Figura 5, pode ser vista a célula de cisalhamento do aparelho de cisalhamento de Jenike (*Jenike shear tester*).

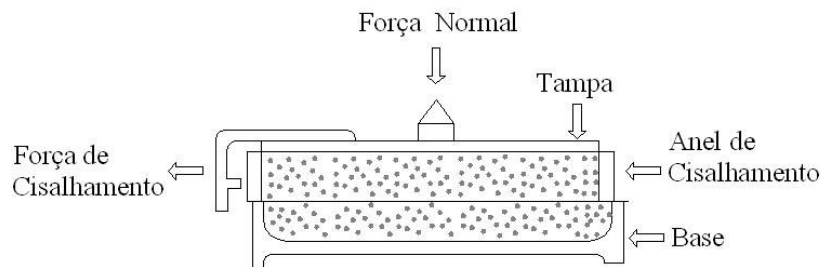


FIGURA 5 Célula de cisalhamento de Jenike.

Para determinação das propriedades, Jenike propôs uma metodologia de ensaio composta de duas etapas: pré-cisalhamento e cisalhamento.

A amostra colocada na célula de cisalhamento, sob uma tensão normal qualquer, ao ser submetida a esforços de cisalhamento, na etapa de pré-cisalhamento, irá aumentar sua massa específica e, conseqüentemente, a tensão cisalhante necessária para romper a amostra também aumenta. Este aumento ocorre até certo limite onde a tensão e a densidade passam a ser constantes (Figura 6 a). A este ponto de tensões e densidade constantes é dado o nome de estado de fluxo estável. Quando o estado de fluxo estável é alcançado, diz-se que a amostra está consolidada criticamente (circulo de tensão (a) da Figura 6 b). A etapa de pré-cisalhamento é realizada para levar o produto ao estado de fluxo estável e para definir o plano de cisalhamento. A fase de pré-cisalhamento é

interrompida assim que o estado de fluxo estável é alcançado. Os valores de tensão normal σ_{pre} e tensão cisalhante τ_{pre} formam o ponto de estado de fluxo estável mostrado no diagrama σ versus τ (Figura 6 b):

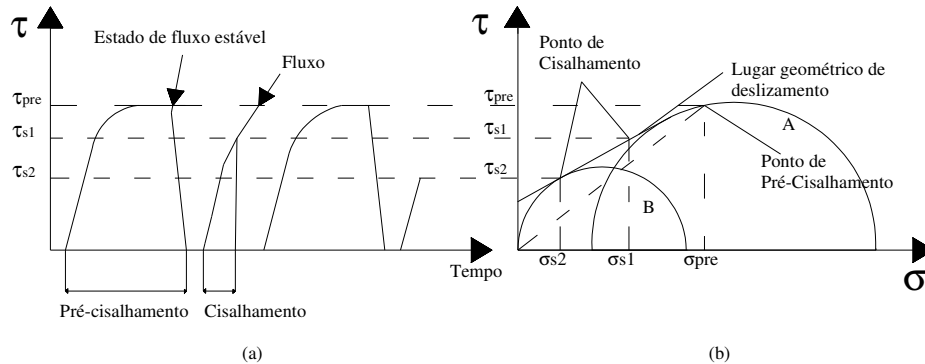


FIGURA 6 - Lugar geométrico de deslizamento.

Após a definição do plano de cisalhamento, na etapa do pré-cisalhamento, a amostra é cisalhada com uma tensão normal inferior ($\sigma_s < \sigma_{pre}$) (Figura 6 a). Nestas condições, a força cisalhante aumenta rapidamente, atinge um valor máximo e depois diminui. O valor máximo representa a tensão cisalhante e esta etapa é denominada de cisalhamento. Na Figura 6 b pode-se observar que o semicírculo B representa a tensão de cisalhamento, mostrada na Figura 6 a. Sob as tensões representadas por este semicírculo, o ponto de deslizamento é alcançado, ou seja, nestas condições de carregamento o produto flui. Sendo assim, se várias amostras são pré-cisalhadas sob a mesma tensão normal (σ_{pre}), mas cisalhadas sob diferentes tensões normais ($\sigma_s < \sigma_{pre}$), se determina um plano de deslizamento, a este plano dá-se o nome de *yield locus*, ou lugar geométrico de deslizamento.

Todos os círculos de tensões que são tangenciais ao lugar geométrico de deslizamento representam estado de tensões em que o produto inicia o fluxo. Sendo assim, o lugar geométrico de deslizamento é a envoltória de todos os círculos de tensões que representam estados de tensões em que o produto inicia o fluxo.

Algumas das propriedades de fluxo podem ser determinadas a partir do lugar geométrico de deslizamento. Algumas delas podem ser determinadas diretamente, como é o caso do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno, outras são determinadas indiretamente, como a função fluxo e o fator fluxo da tremonha.

O ângulo de atrito interno (ϕ_i) é o ângulo formado entre a linha que representa o lugar geométrico de deslizamento e o eixo das tensões normais. A linha, que passa pela origem e tangencia o maior semicírculo de Mohr, ou seja, o círculo que representa o estado de fluxo estável, é chamada de efetivo lugar geométrico de deslizamento e o ângulo formado entre esta linha e o eixo das tensões normais, de efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) (Figura 7).

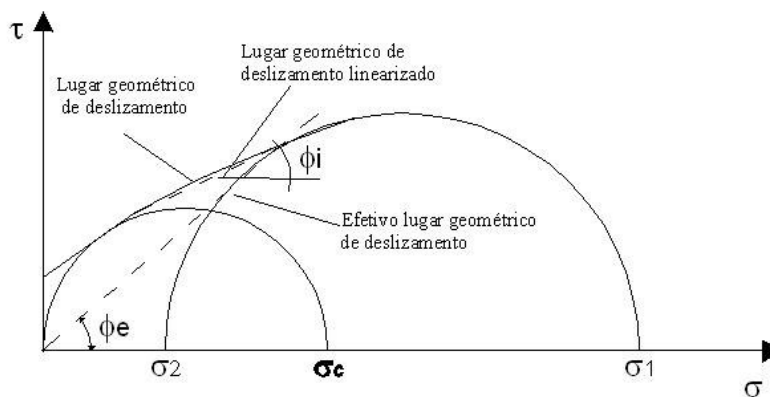


FIGURA 7 - Lugar geométrico de deslizamento.

Fatores como temperatura, umidade e período de armazenamento podem influenciar nos resultados dos testes. Sendo assim, os ensaios deverão ser realizados de acordo com as condições esperadas para o armazenamento do produto.

Alguns produtos apresentam a possibilidade de se consolidar com o tempo de armazenamento. Para medir a influência do tempo na consolidação do produto deve-se utilizar uma bancada de consolidação (Figura 8). A amostra do produto estudado é levada à bancada de consolidação, onde ficará por um tempo que pretende determinar a influência sob uma tensão normal, correspondente a tensão de pré-cisalhamento. Passado o tempo analisado, a célula com a amostra é levada ao aparelho de cisalhamento, onde se procede às etapas de pré-cisalhamento e de cisalhamento.

Produtos que adquirem resistência com o tempo de consolidação, apresentam tensões de cisalhamento maiores para uma mesma tensão normal (Jenike, 1964). Sendo assim, o lugar geométrico de deslizamento nestas condições fica acima do lugar geométrico do produto, sem o efeito tempo de consolidação (Figura 9).



FIGURA 8 - Bancada de consolidação.

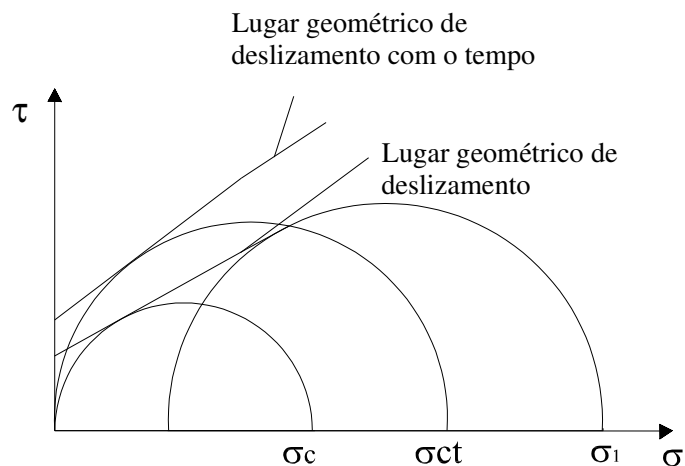


FIGURA 9 - Efeito do tempo de consolidação no lugar geométrico de deslizamento.

Alguns valores que podem ser retirados do gráfico de tensões mostrado na Figura 7 têm grande importância para a análise de outras propriedades de fluxo, sendo eles a tensão de consolidação (σ_1) e a tensão inconfiada de ruptura (σ_c). A tensão de consolidação (σ_1) é igual à tensão principal do maior semicírculo de Mohr, que é tangente ao lugar geométrico de deslizamento. Este semicírculo de tensões representa as tensões no estado de fluxo estável. A tensão inconfiada (σ_c) representa a maior tensão principal do menor semicírculo de Mohr, que é tangente ao lugar geométrico de deslizamento, neste semicírculo de tensões, a menor tensão principal é igual à zero.

Quanto mais consolidado estiver o produto, maior será a tensão de consolidação (σ_1), maior será sua densidade e a tensão inconfiada de ruptura (σ_c). Para cada tensão de consolidação aplicada pode ser determinada então uma densidade e uma tensão inconfiada de ruptura. Sendo assim, a tensão de ruptura

pode ser expressa como sendo função da tensão de consolidação, $\sigma_c = f(\sigma_1)$. A esta função é dado o nome de função fluxo.

Cada produto apresenta uma resistência adquirida em função da tensão de consolidação, ou seja, existem produtos que apresentam um aumento na tensão inconfínada de ruptura (σ_c) maior do que outros, para o mesmo aumento na tensão de consolidação (σ_1), como mostrado na Figura 10.

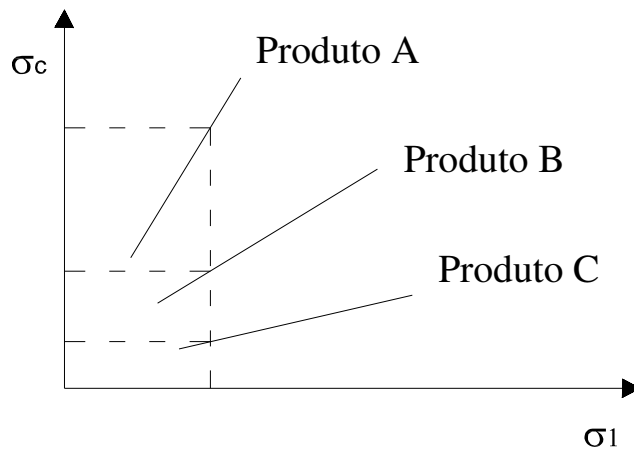


FIGURA 10 Função fluxo (FF), para diferentes produtos.

De acordo com Jenike (1964), a função fluxo pode ser classificada de acordo com determinados valores limites. Sendo esta propriedade uma relação direta entre a pressão de consolidação e a resistência inconfínada, podemos expressar então a função fluxo da seguinte forma:

$$FF = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \quad \text{Equação 1}$$

Jenike (1964) apresenta os seguintes valores limites:

$FF < 2$ Produto muito coesivo, não flui;

$2 < FF < 4$ Produto coesivo;

$4 < FF < 10$ Produto que flui facilmente e

$FF > 10$ Produto de fluxo livre

Outra característica importante, que deve ser prevista ao se projetar um silo, é que alguns produtos, submetidos à pressão de consolidação constante por um tempo, adquirem consolidação. Para estes produtos é necessária a determinação da função fluxo com o tempo (FF_t) (Figura 11). Quando o produto apresenta esta característica, a tensão inconfined de ruptura (σ_c) aumenta em função do tempo de consolidação.

De acordo com Palma (2005), a fluxibilidade do produto não pode ser expressa unicamente por um número. Esta propriedade é função das propriedades físicas dos produtos e das características do equipamento utilizado para manipular, armazenar ou processar o produto.

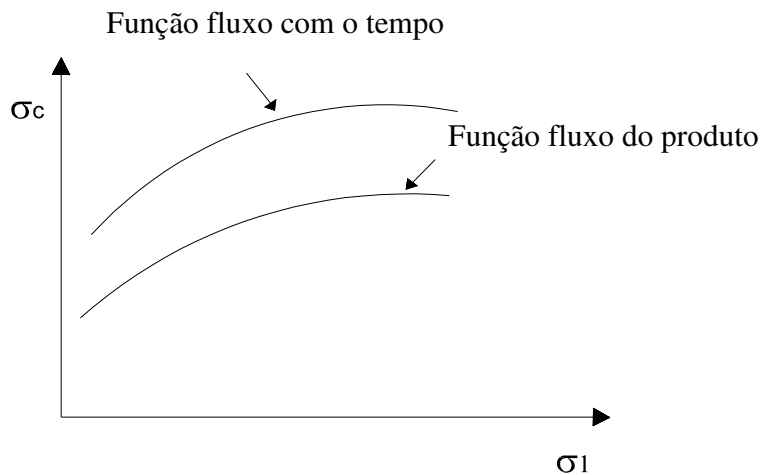


FIGURA 11 - Função fluxo instantânea e função fluxo com o tempo de consolidação.

Outra propriedade de fluxo que pode ser determinada, utilizando-se o aparelho de cisalhamento de Jenike, é o ângulo de atrito com a parede (ϕ_w). Para a determinação desta propriedade deve ser feita a substituição do anel inferior da célula de cisalhamento por uma chapa do material da parede a ser estudada (Figura 12). Os materiais comumente utilizados são: aço liso, aço rugoso, madeira, acrílico e concreto.

As tensões de cisalhamento τ_w , necessárias para deslocar a amostra sobre a chapa, são medidas sobre diferentes tensões normais σ_w . Diferentes tensões normais apresentaram diferentes tensões cisalhantes. Se transferirmos cada par de tensões para o diagrama σ *versus* τ e ligarmos os diferentes pontos resultantes, teremos o lugar geométrico de deslizamento com a parede (Figura 13). O ângulo de atrito com a parede é o ângulo formado entre o lugar geométrico de deslizamento com a parede e o eixo das tensões normais.

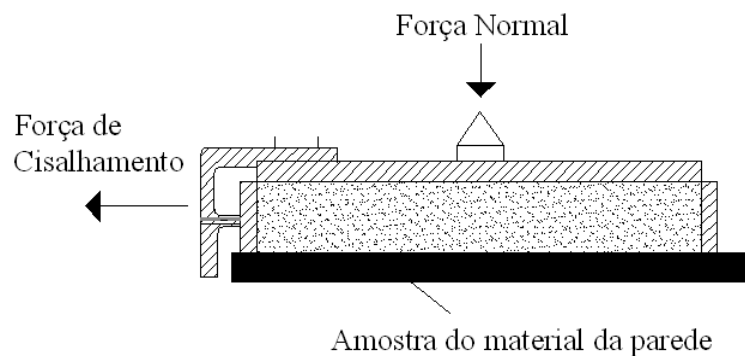


FIGURA 12 - Detalhe da célula de cisalhamento para determinação do ângulo de atrito com a parede (ϕ_w).

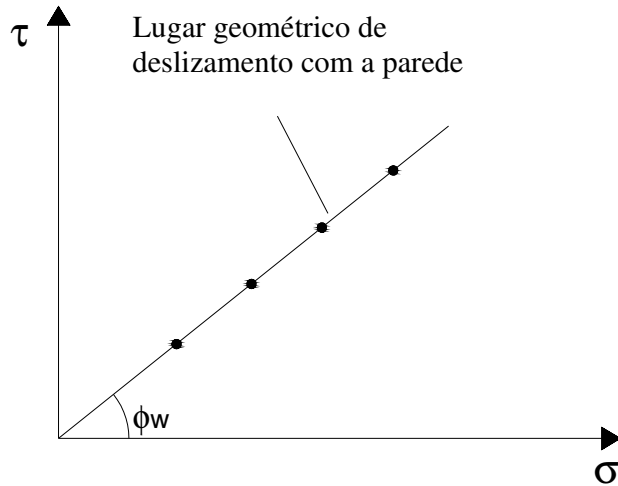


FIGURA 13 - Lugar geométrico de deslizamento com a parede.

2.3.1.4 Fator fluxo da tremonha (ff)

Outra importante propriedade de fluxo, citada anteriormente, é o fator fluxo da tremonha (ff). Esta é uma propriedade que está relacionada com as propriedades físicas do produto armazenado e com as características geométricas do silo. A determinação do fator fluxo da tremonha depende: do efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_c), do ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w) e da geometria e inclinação da tremonha (α).

O fator fluxo da tremonha é dado pela relação entre a tensão de consolidação (σ_1) e a tensão atuando em um arco estável imaginário (σ'_1), como mostrado na Figura 14. O fator fluxo da tremonha também pode ser representado pela equação 2:

$$ff = \frac{\sigma_1}{\sigma'_1} \quad \text{Equação 2}$$

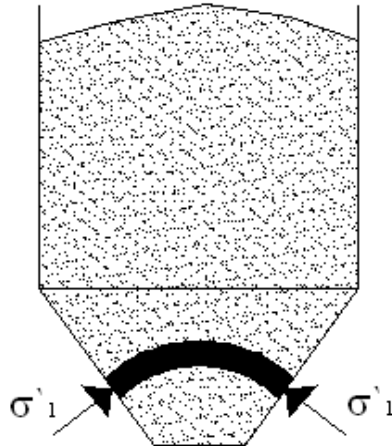


FIGURA 14 - Representação da tensão (σ_1') atuando em um arco estável

As metodologias para a determinação do fator fluxo da tremonha, assim como a sua importância, serão detalhadas adiante (item 2.3.2.2).

2.3.1.5 Ângulo de repouso (ϕ_r)

O ângulo de repouso é o ângulo formado por um talude natural do produto, ou seja, quando o produto não está confinado. Sua importância se verifica na aplicação em cálculos de telhados de coberturas dos silos e inclinações de equipamentos.

A determinação do ângulo de repouso pode ser feita utilizando-se vários equipamentos, medindo, de maneira direta, a inclinação do talude natural do produto.

2.3.2 Fluxo em silos

Segundo Calil Jr. (1990), o tipo de fluxo que irá ocorrer em um silo determina as características de descarga do produto, se haverá ou não a formação de zonas sem movimentação, o tipo de segregação que irá ocorrer e se o silo pode ser esvaziado completamente. O tipo de fluxo determina também a distribuição das pressões nas paredes e fundação do silo.

Os principais tipos de fluxo que podem ocorrer por descarga por gravidade são: fluxo de massa e fluxo de funil (Figuras 15 e 16). O que define qual o tipo de fluxo que ocorrerá na descarga de um silo são as características físicas do produto armazenado, a geometria do silo e a rugosidade da tremonha.

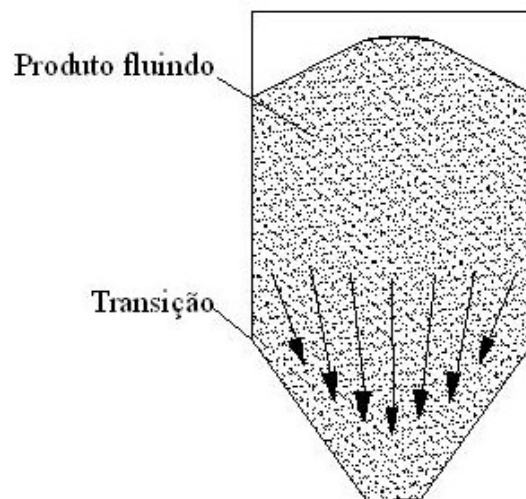


FIGURA 15 - Fluxo de massa.

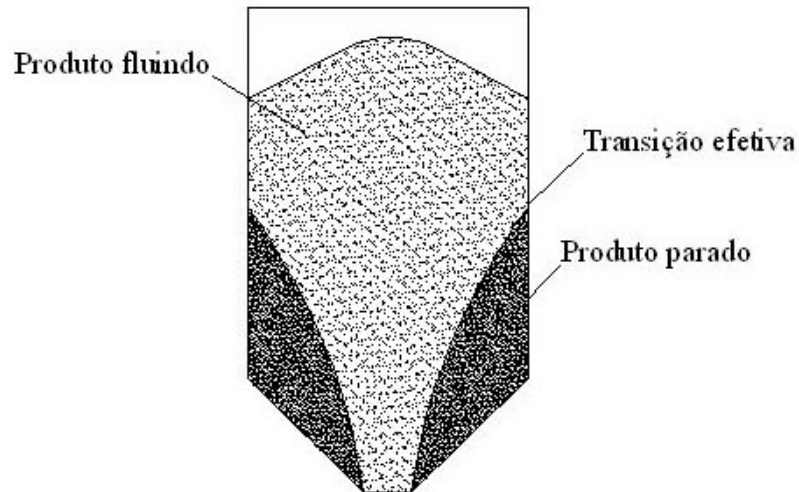


FIGURA 16 - Fluxo de funil.

O tipo de fluxo que poderá ocorrer na descarga de um silo deve ser considerado quando o silo estiver sendo projetado. Características como a uniformidade de descarga, dosagem de produtos, o tempo de conservação do produto armazenado, área disponível para construção do silo e o custo da construção interferem na escolha do tipo de fluxo para projeto.

Geralmente as normas internacionais para projeto de silos oferecem dois gráficos (Figuras 17 e 18) para a determinação do tipo de fluxo. A determinação do tipo de fluxo é função da interação entre as propriedades físicas do produto e a rugosidade da parede da tremonha, representada pelo ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w), além da geometria da tremonha, representada no gráfico pela sua inclinação e forma (cônica ou em cunha).

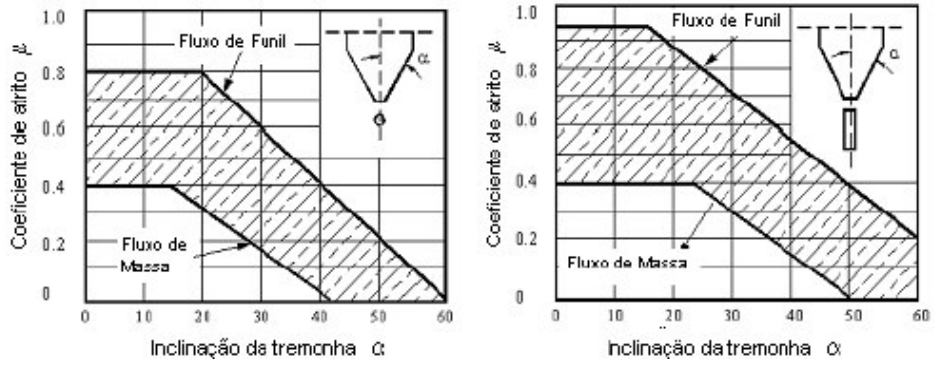


FIGURA 17 - Determinação do tipo de fluxo.
 Fonte: Australian Standart (1996)

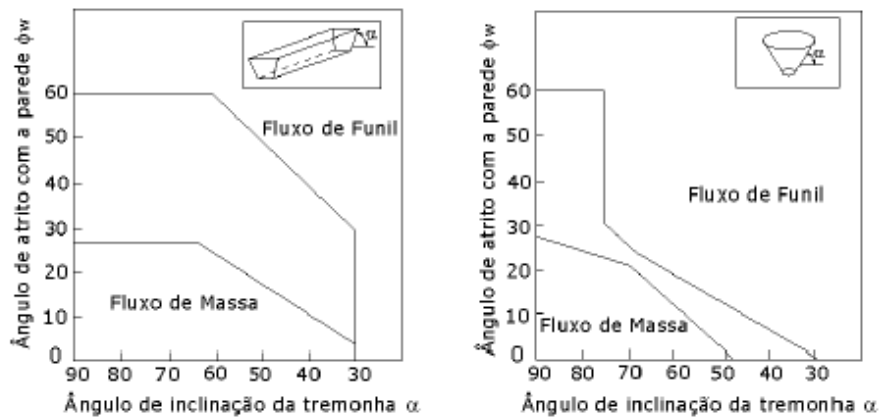


FIGURA 18 - Determinação do tipo de fluxo
 Fonte: DIN 1055 (1987), International Standart (1995), EUROCODE 1 (1991)

2.3.2.1 Obstruções do fluxo

Segundo Jenike (1964), a ocorrência de obstruções do fluxo em silos deve-se ao fato do produto armazenado adquirir resistência, quando consolidado, suficiente para suportar seu próprio peso.

Segundo Calil Jr. (1990) o objetivo de um projeto de silo para esvaziamento por gravidade é que o fluxo ocorra sem obstruções. O autor destaca dois principais tipos de obstruções de fluxo: arco e tubo (Figura 19). Durante a descarga do produto, caso nenhuma destas obstruções ocorra, o produto fluirá facilmente.

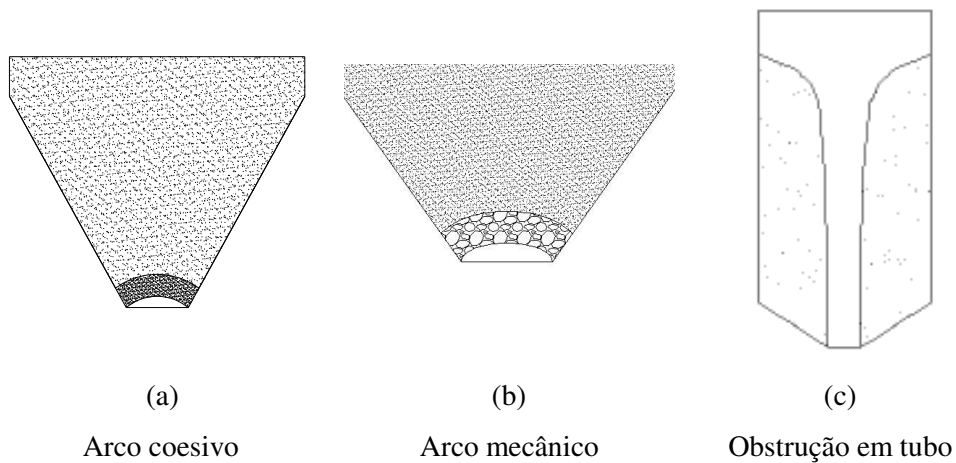


FIGURA 19 - Obstruções do fluxo em silos.

Como visto na Figura 19 (a), a ocorrência de um arco coesivo é resultado da consolidação e resistência do sólido armazenado. A formação de um arco mecânico (Figura 19 b) ocorre devido ao arranjo das partículas do sólido, quando a média das dimensões destas é grande, comparada com a abertura da boca da tremonha. A formação de um arco coesivo ocorre mais em produtos de granulometria fina e coesivos, ao contrário da formação de arcos mecânicos que ocorre em produtos de granulometria maior.

A formação de tubos ocorre com maior frequência em silos de fluxo de funil. Quando o produto armazenado aumenta sua resistência com o tempo de armazenamento, o risco de ocorrência deste tipo de obstrução também aumenta.

2.3.2.2 Requisitos para evitar obstruções de fluxo

O objetivo no projeto de silos para prevenir a formação de obstruções é determinar a dimensão da boca de descarga e a inclinação ideal para a tremonha do silo, levando em consideração o espaço disponível para projeto, custo e o produto armazenado. Consideremos o sólido fluindo na célula da Figura 20. O sólido estava inconsolidado quando foi depositado no topo da célula, mas na medida em que o sólido vai descendo, quando a célula está sendo esvaziada, a consolidação aumenta e, conseqüentemente, a tensão de consolidação (σ_1) também. Como resultado desta consolidação, a resistência do sólido, representada por σ_c , que é a tensão inconfínada de ruptura, também aumenta. Pode se perceber pelo gráfico que tanto a tensão de consolidação, quanto a resistência inconfínada aumentam até a transição entre a parede vertical do silo e a tremonha, onde elevam significativamente seus valores, o que é conhecido como pico de pressão. A partir deste ponto, as tensões decrescem até zero.

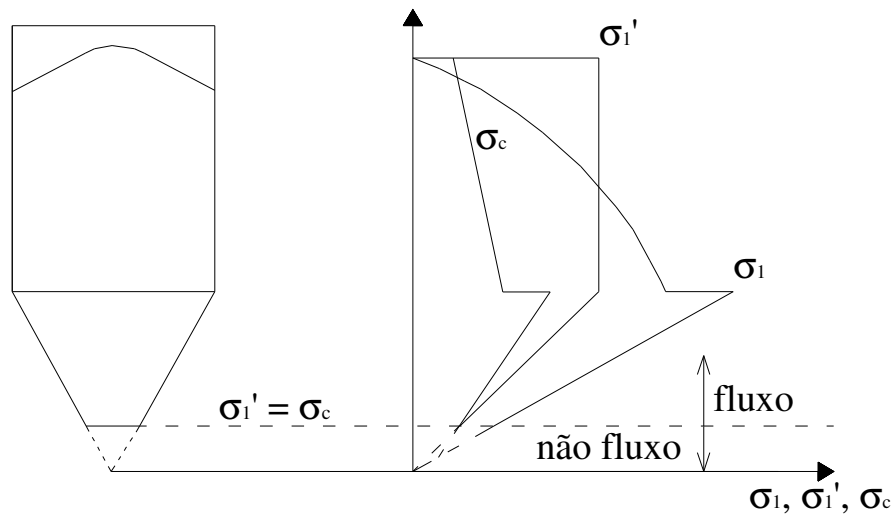


FIGURA 20 - Análise para a não formação de arcos.

A partícula analisada está sendo solicitada todo o tempo por uma tensão σ'_1 , que representa a tensão adquirida em um arco estável imaginário. Quando σ'_1 excede σ_c , o produto não tem resistência suficiente para suportar o arco; nesta situação, ocorrerá o fluxo. Quando os valores de σ_c excedem σ'_1 , o produto adquiriu resistência suficiente para suportar o seu próprio peso, ocorrendo então a formação de obstrução. A tensão σ'_1 é diretamente proporcional ao vão do arco. Portanto, a dimensão mínima da boca de descarga, conhecida como seção crítica para projeto, é quando σ'_1 for igual a σ_c .

Em termos de projeto, segundo Jenike (1964), deve ser utilizado o critério de fluxo ou não fluxo. Este critério consiste em transferir para forma gráfica (Figura 21) o que foi discutido anteriormente, ou seja, a relação entre a tensão confinada de consolidação (σ_c), que representa a resistência do sólido, e a tensão adquirida em um arco imaginário (σ'_1). Esta relação é feita indiretamente comparando a função fluxo com o fator fluxo da tremonha, uma vez que a função fluxo do produto (FF) relaciona a tensão de consolidação e a

tensão inconfiada de ruptura e o fator fluxo da tremonha (ff) relaciona a tensão de consolidação com a tensão adquirida pelo arco imaginário, como mostrado nas equações 1 e 2.

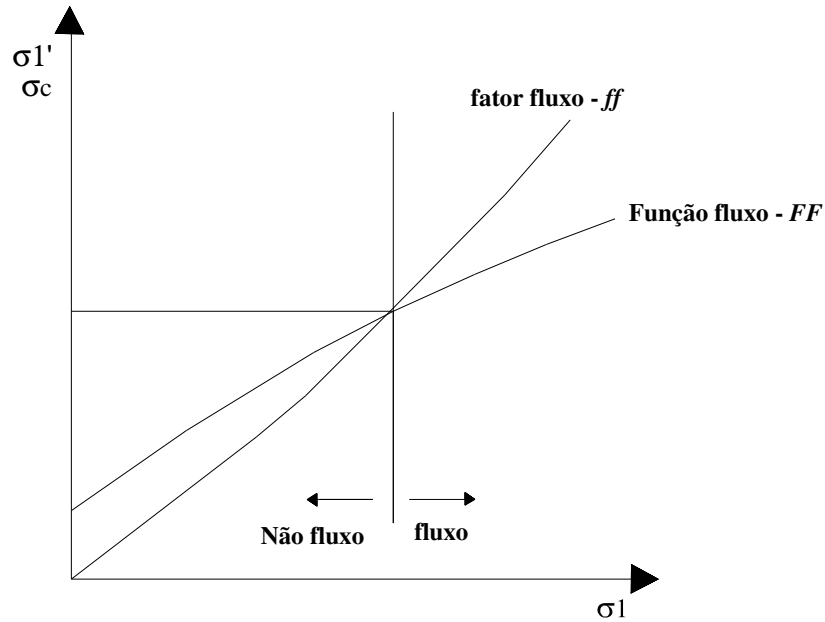


FIGURA 21 - Critério do fluxo ou não fluxo.

A reta formada pelos pares de ponto tensão de consolidação inconfiada é a função fluxo. A reta que representa o fator fluxo da tremonha é traçada passando pela origem com uma inclinação $\cot \text{angente} \left(\frac{1}{ff} \right)$. A tensão crítica é dada pela interseção das retas do fator fluxo com a reta da função fluxo.

Para ocorrer o fluxo por gravidade, a tensão adquirida para formação do arco deve ser maior do que a tensão inconfina de consolidação. Sendo assim, como visto na Figura 21, o fluxo ocorrerá quando o fator fluxo da tremonha for maior do que a Função Fluxo do produto.

Produtos de fluxo livre, geralmente, apresentam a reta da Função Fluxo (FF) sempre acima do fator fluxo da tremonha (*ff*). Para estes produtos, o dimensionamento da boca de descarga deve ser feito em função de algum dispositivo de descarga ou, no caso de partículas maiores, em função da granulometria do produto, visando evitar a formação de arcos mecânicos. No caso de se dimensionar em função da granulometria, a menor dimensão da abertura deve ser 8 vezes a dimensão da maior partícula para boca circular, 9 vezes para abertura quadrada ou retangular e 4 vezes para aberturas em forma de canal, com relação comprimento/largura maior que 6.

Em alguns casos, a Função Fluxo do produto (FF) se situa sempre abaixo da reta que representa o fator fluxo da tremonha (*ff*); isto significa que, no silo em questão, o produto irá adquirir resistência junto à boca de descarga para suportar seu próprio peso; desta forma, para promover o fluxo por gravidade é necessário substituir o material da parede do silo por um mais liso, fazendo com que a tensão adquirida (σ'_1) diminua, promovendo o fluxo. Caso não seja possível alterar a geometria, ou mesmo substituir o material da parede da tremonha, algum dispositivo de descarga deve ser utilizado. Também deverá ser utilizado algum dispositivo, como vibradores, para iniciar o fluxo, quando o produto consolida com tempo de armazenamento e o fator fluxo da tremonha não intercepte a reta da Função Fluxo do produto (FF). Segundo Jenike (1964) ao ser utilizado vibrador como dispositivo, a boca de descarga deverá ser dimensionada considerando o efeito da vibração. O fator fluxo do produto, sem o tempo, deverá ser multiplicado por 1,5, resultando em uma tensão crítica maior, e uma abertura da boca de descarga também maior.

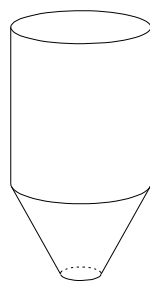
2.3.2.3 Tremonha

Em se tratando de tremonha de silos para fluxo por gravidade, deverão ser dimensionadas a forma geométrica, a inclinação da parede e a boca de descarga.

Existem diversas formas geométricas utilizadas para projeto de tremonha, entretanto as mais comuns são: cônica, cunha e piramidal (Figura 22).

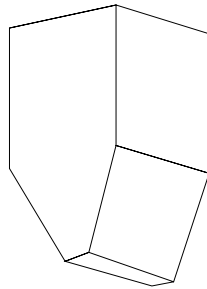
Para um mesmo produto e para o mesmo padrão de fluxo, as tremonhas cônicas necessitam de maior altura que as tremonhas em cunha. Outra característica é que a menor dimensão da boca de descarga, para a tremonha cônica, é geralmente maior que a menor largura necessária para a boca de descarga da tremonha em cunha.

Segundo Schulze (1998), para obtenção do fluxo de massa em tremonhas piramidais, suas arestas deverão ser arredondadas internamente para que o produto supere o atrito com a parede nos dois lados que suportam as zonas estagnadas.



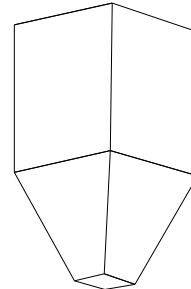
(a)

Tremonha cônica



(b)

Tremonha em cunha



(c)

Tremonha piramidal

FIGURA 22 - Formas de tremonha.

Outro parâmetro a ser levado em consideração no projeto de silos, que influencia no fluxo do produto e nas pressões atuantes na parede, é a inclinação da tremonha. Para sua determinação podem ser utilizados os diagramas mostrados na Figura 23 (tremonhas cônicas e em cunha). Estes diagramas são resultados das equações propostas por Jenike em 1964. Nestes, o autor determina a inclinação crítica para a ocorrência do fluxo de massa em função das características do produto, representada pelo efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) e da interação entre as propriedades do produto e da superfície da parede da tremonha, representada pelo ângulo de atrito com a parede (ϕ_w).

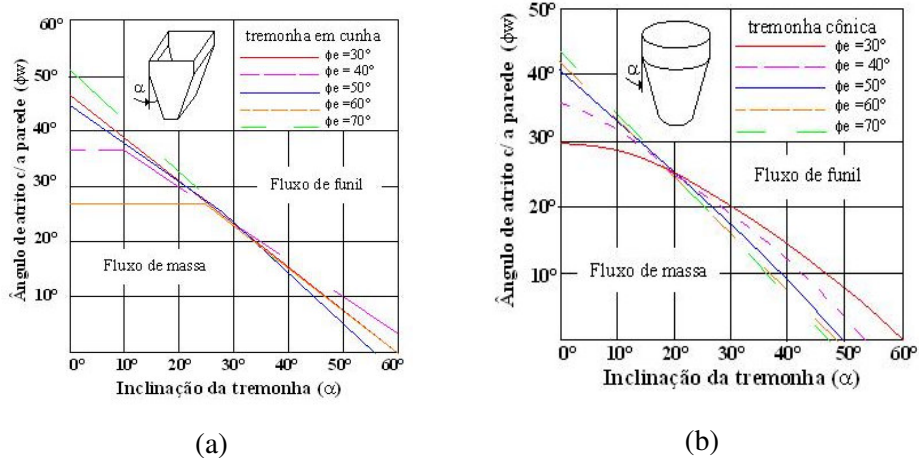


FIGURA 23 - Diagrama para determinação da inclinação das tremonhas.
Fonte: Schulze (1998)

Outra forma para a determinação da inclinação da tremonha é citada por Calil Jr. et al. (1997). É proposta a utilização das equações 3 e 4 para a determinação da inclinação máxima para fluxo de massa.

- Para tremonhas de eixo simétrico

$$\alpha_{crit} = 0,5x \left\{ 180x \cos^{-1} x \left[\frac{(1 - \text{sen}\phi_e)}{2.\text{sen}\phi_e} \right] - \left[\phi_w + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}\phi_w}{\text{sen}\phi_e} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

- Para tremonhas em cunha

$$\alpha_{crit} = \frac{e^{3,75x,01(\phi_e-30)/10} - \phi_w}{0,725x(\text{tg}\phi_e)^{0,2}} \quad (4)$$

Conforme Gaylord & Gaylord (1984), para tremonhas em bisel ou em cunha, o fluxo de massa ocorrerá se:

$$\alpha \leq 60^\circ - 1,33x\phi_w$$

$$\phi_w \leq 0,9x\phi_e$$

$$L \geq 6xb_p$$

Como dito anteriormente, para projeto de silos com descarga por gravidade, é necessário o dimensionamento adequado da boca de descarga, levando em consideração o critério de fluxo ou não fluxo. Para projetar a saída ideal é necessário o conhecimento do fator fluxo da tremonha (*ff*) e da Função Fluxo do produto (FF) (seção 2.3.1.3), determinando assim a tensão crítica na qual o produto flui por gravidade.

Jenike (1980) publicou alguns gráficos para a determinação do fator fluxo da tremonha. Como pode ser visto na Figura 24, a determinação do fator fluxo é função do ângulo de atrito com a parede, do efetivo ângulo de atrito interno e da forma e inclinação da tremonha, ou seja, é dependente da interação entre as propriedades do produto armazenado e das características geométricas e da superfície do silo.

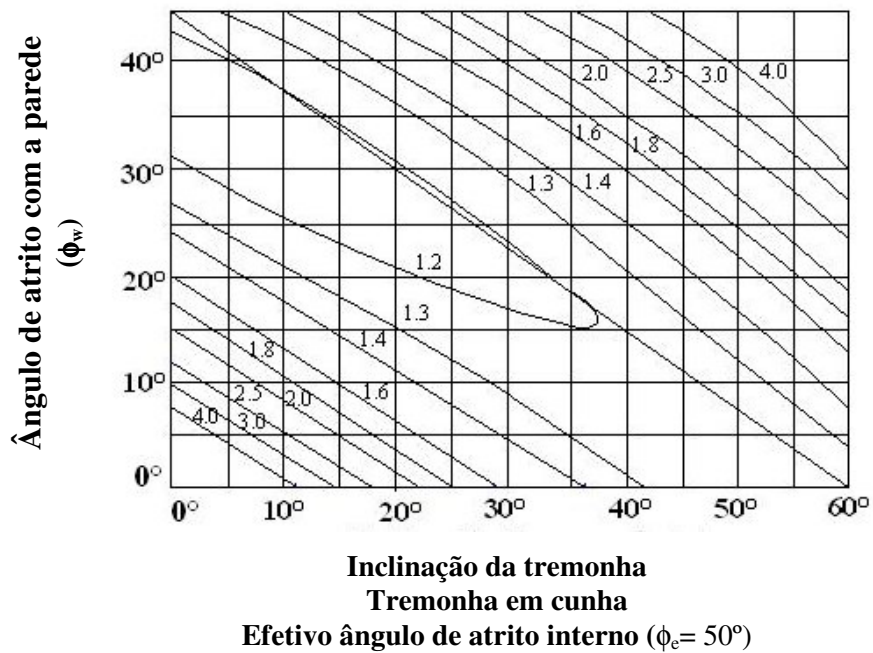


FIGURA 24 - Gráfico para a determinação do fator fluxo da tremonha
Fonte: Jenike (1980)

Enstad (1975) propôs um equacionamento que permite determinar o fator fluxo da tremonha (Palma, 2005):

$$F(\alpha) = \left(\frac{65}{130 + \alpha} \right)^m x \left(\frac{200}{200 + \alpha} \right)^{1-m} \quad (5)$$

$$2x\beta = \phi_{ws} + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}\phi_{ws}}{\text{sen}\phi_{es}} \right) \quad (6)$$

$$\theta = \beta + \alpha \quad (7)$$

$$X = \frac{2^m x \text{sen}\phi_{es}}{1 - \text{sen}\phi_{es}} \left[\frac{\text{sen}(\beta + \theta)}{\cos(90 - \alpha)} + 1 \right] \quad (8)$$

$$Y = \frac{[2x(1 - \cos\theta)]^m x \theta^{1-m} x \cos(90 - \alpha) + \text{sen}\beta x (\text{sen}\theta)^{1+m}}{(1 - \text{sen}\phi_{es}) x (\text{sen}\theta)^{2+m}} \quad (9)$$

$$ff = \frac{Yx(1 + \text{sen}\phi_{es})}{2x(X - 1)x F(\alpha)x \cos(90 - \alpha)} \quad (10)$$

Onde:

ϕ_{es} → Valor superior do efetivo ângulo de atrito interno;

ϕ_{ws} → Valor superior do ângulo de atrito com a parede;

α → Inclinação da tremonha;

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

L → maior dimensão da boca de descarga retangular (cm);

$m = 1$ para tremonhas de eixo simétrico.

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

A tensão crítica, tensão esta que determina a menor dimensão da boca de descarga para ocorrência do fluxo, é determinada pelo gráfico mostrado na Figura 21.

Outro fator utilizado por Jenike (1964), para o dimensionamento da boca de descarga, é a função $H(\alpha)$. Esta função, não muito bem definida, é um fator dependente da forma e inclinação da tremonha. Sua determinação é feita através de gráficos como o da Figura 25.

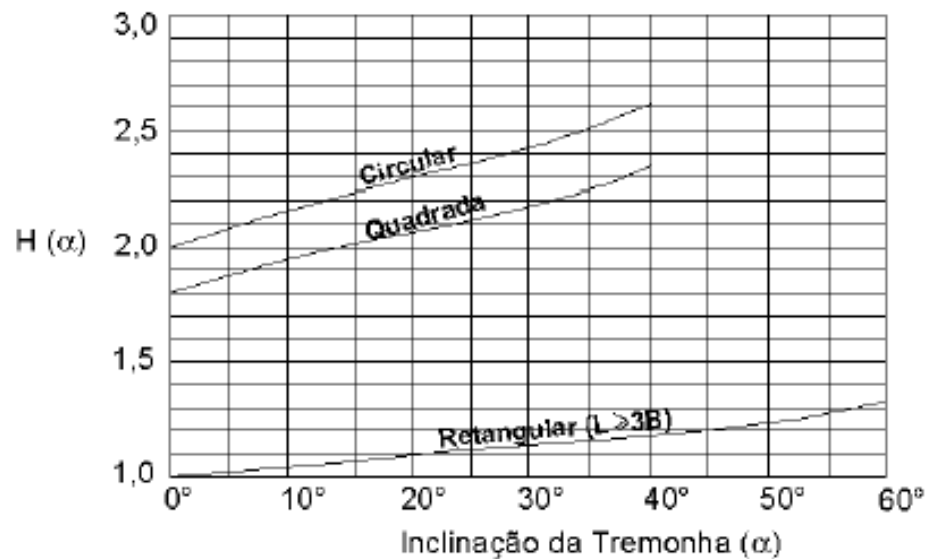


FIGURA 25 - Determinação da função $H(\alpha)$ para tremonhas cônicas e em cunha. Fonte: Jenike (1980)

A menor dimensão da boca de descarga para projeto de silos com fluxo de massa é dada por:

$$b_{\min} = \frac{H(\alpha)x\sigma_{crit}}{\gamma} \quad (11)$$

Segundo Jenike (1964), a dimensão mínima obtida pela equação (11) deve ser multiplicada por 1,2 como fator de segurança.

Gaylord & Gaylord (1984), sugerem as seguintes equações, para projeto de silos com fluxo de massa:

$$b_{\min} \geq \frac{2,2 \cdot \sigma_{crit}}{\gamma}, \text{ para bocas circulares} \quad (12)$$

$$b_{\min} \geq \frac{1,3x\sigma_{crit}}{\gamma}, \text{ para bocas retangulares} \quad (13)$$

Em se tratando de projetos com fluxo de funil, a dimensão mínima da boca de descarga é dada por (Jenike 1964):

$$b_{\min} = \frac{G(\phi_i)x\sigma_{crit}}{\gamma} \quad (14)$$

O fator $G(\phi_i)$ é conhecido como fator de tubo. O fator de tubo é função do ângulo de atrito interno, como pode ser visto no gráfico da Figura 26:

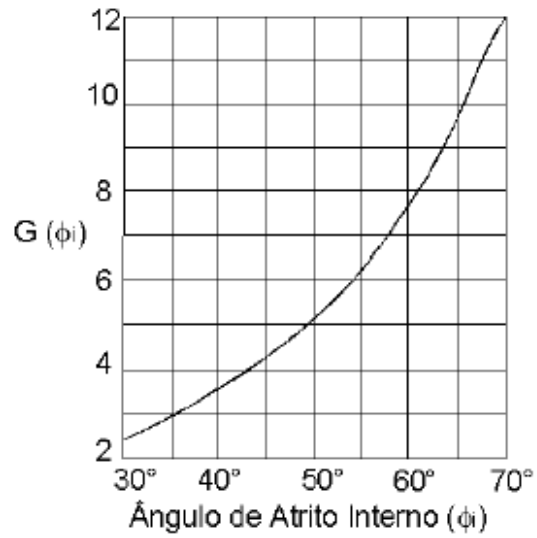


FIGURA 26 - Fator de tubo $G(\phi_i)$.
Fonte: Jenike (1964)

2.3.3 Ações em silos

As ações que devem ser consideradas para projeto de silos são divididas em permanentes, variáveis e excepcionais.

Por ações permanentes entendem-se como sendo as constituídas pelo peso próprio da estrutura, da plataforma e dos equipamentos instalados na cobertura e/ou suspensos pela tremonha.

Segundo Silva (1998), as ações variáveis que devem ser consideradas são:

- Carga devido ao produto armazenado, sendo esta dividida em duas, ou seja, as cargas de carregamento do produto no silo e as cargas induzidas pelo fluxo do produto armazenado;
 - Forças das correias transportadoras presas à estrutura do silo;
 - Pressão ou sucção interna dos gases;
 - Força de contenção lateral;
 - Força de fixação de elementos externos na estrutura;
 - Ação do vento

Silva (1998) destaca também a importância de se considerar as ações variáveis especiais:

- Ações devido ao recalque diferencial da fundação;
- Ação devido ao diferencial de temperatura;
- Expansão do produto na descarga.

As ações excepcionais são as ocorridas devido ao impacto de veículos contra a estrutura e devido à explosão de pós.

Outra importante característica que deve ser observada, a respeito das pressões incidentes nas paredes, é o ciclo de carregamento do silo. Durante o seu tempo de uso, o silo é solicitado por uma série de ciclos: armazenamento, carregamento e descarga. Como visto na Figura 27, as tensões que ocorrem

enquanto o silo está sendo carregado são completamente diferentes das tensões dinâmicas, que ocorrem no descarregamento do silo. Esta diferença, entre as pressões de carregamento e descarga, são picos de pressão que devem ser considerados em projetos de silos.

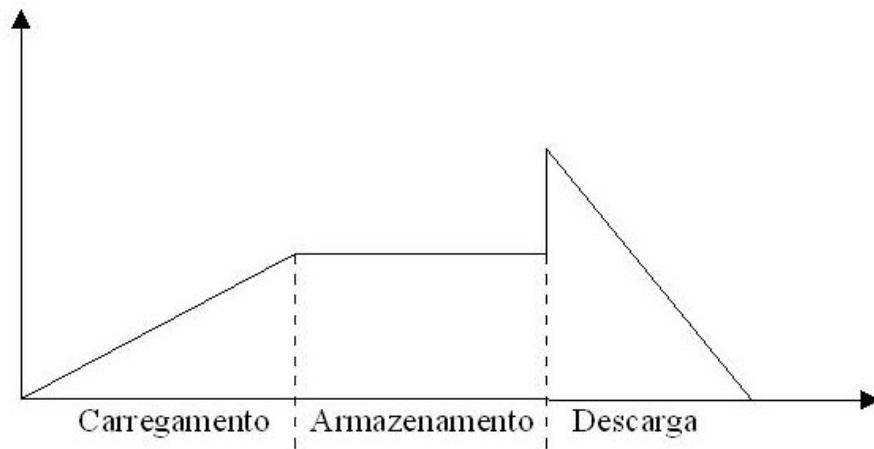


FIGURA 27 - Pressões na parede do silo em função dos ciclos de carregamento, armazenamento e descarga.

2.3.3.1 Ações devido ao produto armazenado

Os primeiros silos para armazenamento de cereais foram dimensionados considerando que as pressões que incidiam sobre suas paredes tinham o mesmo comportamento que as pressões hidrostáticas (Figura 28).

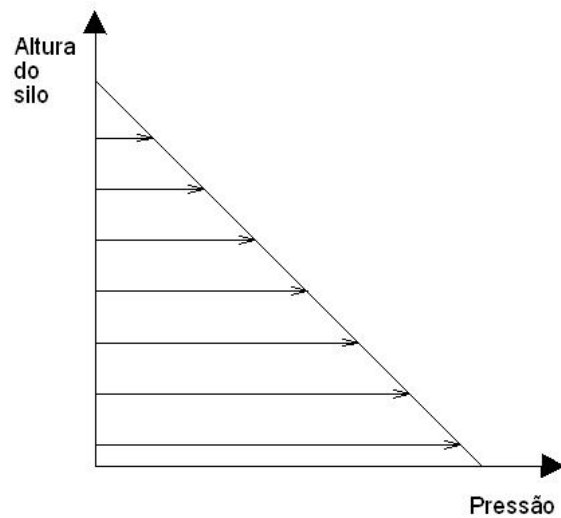


FIGURA 28 - Pressões hidrostáticas.

As ações devido ao produto armazenado exercem pressões nas paredes verticais e no fundo do silo. Nas paredes verticais atuam pressões perpendiculares, denominadas de pressões horizontais (P_h) e pressões de atrito do produto com a parede (P_w). No fundo do silo, atuam as pressões denominadas de pressões verticais, que são representadas pelas pressões perpendiculares à parede da tremonha (P_n) e pressões de atrito na parede da tremonha (P_i) (Figura 29).

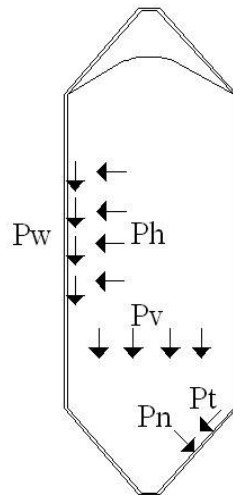


FIGURA 29 - Pressões atuantes em um silo.

Ravenet (1992) cita que em 1882 Roberts, na Inglaterra, iniciou os primeiros estudos para a determinação das pressões laterais e verticais em silos. Foram realizados ensaios com trigo em células de até 16 metros de altura. Os resultados obtidos por Roberts foram discrepantes e contraditórios em relação às leis que governam o fluxo e pressões de fluidos.

Um dos trabalhos considerados de maior importância no estudo das pressões em silos foi o mostrado por Janssen em 1895, na Alemanha. Janssen propôs a teoria conhecida como método da camada elementar (Ravenet, 1992). A teoria de Janssen é utilizada ainda hoje pela maioria das normas internacionais para o cálculo das pressões estáticas e de carregamento. As pressões dinâmicas também podem ser determinadas pela mesma teoria. Entretanto, devem ser utilizados coeficientes de sobrepressão aos valores obtidos nas condições estáticas.

De acordo com Ravenet (1992) em 1896, Prante, na Alemanha, conduzindo ensaios em dois silos verticais, obteve valores de pressões laterais

menores do que os de Janssen, observando que as pressões de descarga aumentavam rapidamente e foram até 4 vezes maior que as pressões estáticas. Jamiesson, em 1900, apresentou os resultados obtidos em seus ensaios, mostrando o comportamento das pressões para diferentes condições de descarga centrada e excêntrica, observando a ocorrência de um acréscimo de 40 % durante a descarga nos valores das pressões estáticas. Pleizner, em 1902, realizou ensaios em trigo armazenado em diferentes silos. Concluiu que: 1- A relação entre as pressões laterais e verticais é maior para pequenas alturas de grãos. 2- A relação entre a pressão vertical e a horizontal varia em função do tipo de célula e da rugosidade da parede. 3- No caso de descarga excêntrica, a sobrepressão aparece no lado oposto à boca de saída. Em 1941, Reimbert determinou valores de coeficiente de sobrepressão, oscilando de 1,53, para silos com relação altura/lado igual a 1, até 2,34, para silos com relação altura/lado igual a 5, ambos com múltiplas saídas. Para silos com descarga centrada, os coeficientes determinados pelo autor foram 1,49 e 2,21 para as relações altura/lado igual a 1 e 5.

2.3.3.2 Teoria de JANSSEN

A teoria de Janssen é baseada nas seguintes hipóteses:

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

As pressões vertical e horizontal são determinadas pelo equilíbrio das forças verticais que atuam numa camada infinitesimal do produto armazenado.

Sobre esta camada infinitesimal, atuam o peso próprio da mesma, as forças nas faces superior e inferior, devidas ao produto armazenado e a força devida ao atrito entre o produto e a parede (Figura 30).

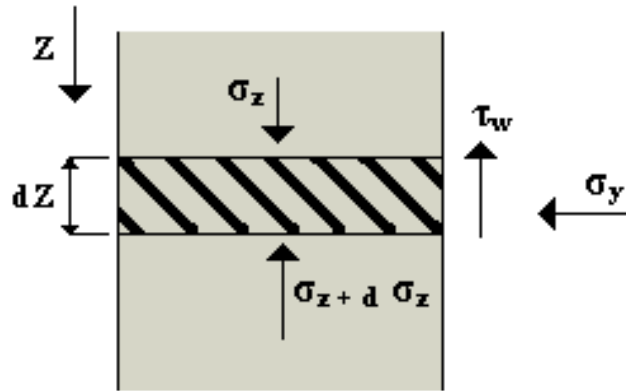


FIGURA 30 - Forças agindo sobre uma camada infinitesimal.
Fonte: Haaker (1999)

Sendo:

q = pressão de atrito sobre a parede, onde $q = \mu \times \text{tg}\phi_w$.

γ = peso específico do produto;

A = área da seção transversal horizontal do silo;

l = perímetro da seção transversal;

z = altura do produto acima da seção transversal considerada;

R = raio hidráulico.

Sendo a força de atrito total que atua na camada infinitesimal:

$$q_{total} = q \times l \times dz \quad (15)$$

Através do equilíbrio das forças na direção vertical, chega-se à seguinte equação diferencial:

$$\frac{dp_v}{z - \frac{\mu' x k x p_v}{R}} = dy \quad (16)$$

Integrando-se a equação anterior, temos:

$$\ln\left(z - \frac{\mu' k p_v}{R}\right) = \left(-\frac{\mu' k}{R} z\right) + c \quad (17)$$

Quando $z = 0$, tem-se $p_v=0$, então $c = \ln(z)$ e, chega-se às equações de Janssen:

- Pressão horizontal:

$$Ph = \frac{\gamma x R}{\mu'} x \left(1 - e^{-\frac{\mu' K}{R} z}\right) \quad (18)$$

- Pressão vertical:

$$Pv = \frac{\gamma x R}{K x \mu'} x \left(1 - e^{-\frac{\mu' K}{R} z}\right) = \frac{Ph}{K} \quad (19)$$

- Pressão de atrito por $1m^2$ de superfície de parede:

$$Pw_f = \gamma x R x \left(1 - e^{-\frac{\mu' K}{R} z}\right) \quad (20)$$

2.3.3.3 Pressões em silos segundo a norma DIN 1055 (1987)

A norma alemã é considerada por engenheiros e projetistas como sendo uma norma conservadora. Entretanto, neste trabalho, está sendo referenciada por ser uma das mais completas, em se tratando de projeto de silos.

Assim como a norma americana, a australiana, ou diversas outras, a norma alemã também utiliza a teoria de Janssen para o cálculo das pressões atuantes em silos.

Os valores determinados pela teoria de Janssen dizem respeito às pressões estáticas de carregamento.

A norma DIN sugere a utilização de um coeficiente de sobrepressão (C) para a determinação das pressões horizontal e de atrito, que ocorrem durante a descarga do produto, conforme mostrado nas equações 21 e 22.

$$Phd = PhcxC \quad (21)$$

$$Pwd = Pwcx1,1 \quad (22)$$

Onde:

Phd → Pressão horizontal de descarregamento

Phc → Pressão horizontal de carregamento

Pwd → Pressão de atrito de descarga

Pwc → Pressão de atrito de carregamento

A norma sugere a utilização de alguns valores para o coeficiente de sobrepressão (C), utilizado no cálculo da pressão horizontal de descarga, conforme a Tabela 2.

TABELA 2 - Coeficiente de sobrepressão segundo a norma DIN 1055 (1987).

Produto armazenado	Coeficiente de sobrepressão (C)
Açúcar, cimento, cinzas, pó de carvão e cal hidratada	1,2
Cascalho de concreto, fosfatos, beterraba, carvão, coque e ferro	1,3
Trigo, cevada, farinha, areia, soja, batatas, escória de caldeira	1,4
Cascas	1,5
Milho	1,6
Ração	1,7

O valor da pressão vertical de descarga é sempre menor que a pressão de carregamento, uma vez que a relação entre a pressão horizontal e a pressão vertical, definida pelo índice K, permanece a mesma, conforme as equações 23 e 24.

$$K = \frac{Ph}{Pv} \quad (23)$$

$$K = 1,2x(1 - \text{sen}\phi_i) \quad (24)$$

A mesma norma também recomenda que sejam adicionadas pressões não uniformes à pressão horizontal de descarga, determinada para condições uniformes.

A ocorrência de pressões adicionais, assim como a posição em que ela irá ocorrer em um silo, depende do padrão de fluxo previsto.

Em silos que serão projetados para fluxo de funil deve ser considerada a ocorrência de sobrepressão na zona de transição entre produto estagnado e produto fluído (Figura 31).

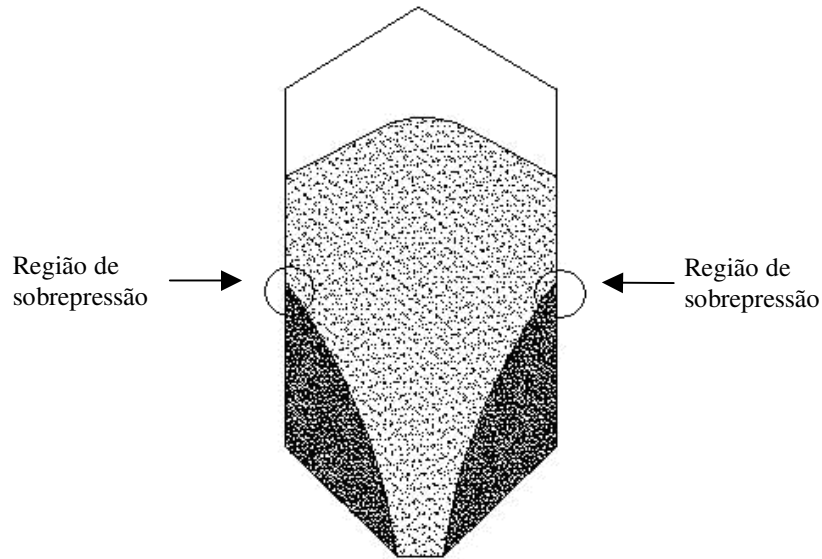


FIGURA 31 - Ocorrência de sobrepressão em silos de fluxo de funil.

Nestas circunstâncias, a norma alemã faz uma distinção entre dois tipos de silos: 1) silos que são enrijecidos na base e no topo e cujas paredes resistam às pressões horizontais. 2) Silos que não possuem enrijecimento e as paredes não resistem às pressões horizontais. No primeiro caso, além do coeficiente de sobrepressão, devido às características do produto, a pressão horizontal de carregamento é multiplicada por um coeficiente C_k , conforme mostrado na equação 25.

$$P_{hd} = P_{hc} \cdot C_x \cdot C_K \quad (25)$$

- Para silos cilíndricos:

$$r/t \leq 70 \rightarrow C_k = 1 + \beta(0,5 + 0,02r/t) \quad (26)$$

$$r/t \geq 100 \rightarrow C_k = 1 + 3\beta\sqrt{\frac{h}{dc}} \quad (27)$$

$70 < r/t < 100 \rightarrow$ interpolação linear

Onde:

$r \rightarrow$ raio do silo

$t \rightarrow$ espessura da parede do silo (Figura 32)

- Para silos poligonais e prismáticos:

$$C_k = 1 + 0,8\beta \quad (28)$$

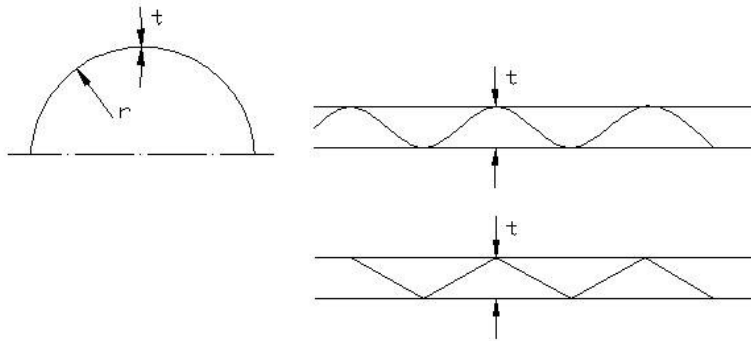


FIGURA 32 - Raio (r) do silo e espessura (t) da parede do silo.

Nas condições onde não estão previstos reforços, nem na base nem no topo do silo, e as paredes do silo não resistirão às pressões horizontais, a norma considera a sobrepressão atuando em duas áreas diametralmente opostas (Figura 33), assumindo que cada área tenha lados $l = 0,2D$. A sobrepressão é dada por:

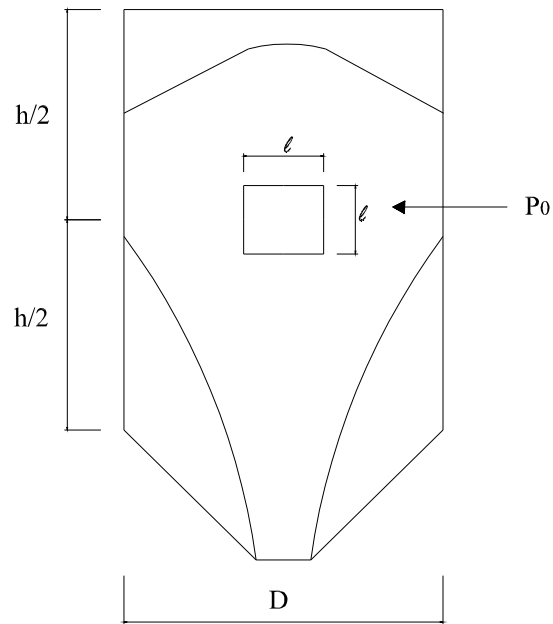


FIGURA 33 - Área de sobrepressão.

$$p_0 = \beta x P_{hd} \quad (29)$$

$$P_0 = p_0 (0,04d^2) \quad (30)$$

Onde:

$P_0 \rightarrow$ sobrepressão total em cada área.

Nas duas condições devem ser determinados o coeficiente β , coeficiente que relaciona as características geométricas do silo e o produto armazenado (Calil Jr et al., 1997):

$$\beta = \beta_h \times \beta_a \times \beta_r \times \beta_g \quad (31)$$

Sendo:

$\beta_h \rightarrow$ Coeficiente de esbeltez do silo:

Para $h/dc < 1$ $\beta_h = 1,00$

Para $1 \leq h/dc \leq 4$ $\beta_h = 0,20 h/dc + 0,80$

Para $h/dc > 4$ $\beta_h = 1,60$

Onde; $dc \rightarrow$ diâmetro circunscrito à seção transversal do silo;

$h \rightarrow$ Altura do silo

$\beta_a \rightarrow$ Coeficiente de excentricidade;

Para $a/r < 1/3$ $\beta_a = 1$

Para $a/r \geq 1/3$ $\beta_a = 3 (a/r)$

Sendo $a =$ excentricidade da boca de descarga

$\beta_r \rightarrow$ Coeficiente de rigidez do silo;

Para $r/t \leq 70$ $\beta_r = 0,30$

Para $r/t \geq 100$ $\beta_r = 0,05$

Para $70 < r/t < 100$ interpolação linear

$\beta_g \rightarrow$ função do tipo de produto

- Açúcar, areia, cascalho para concreto = 0,40
- Trigo, cevada, calcário, cimento, fosfato, soja, beterraba, batata, cinza = 0,50
- Farinha, carvão, coque, escória de caldeira e cal hidratada = 0,60
- Cascas = 0,70

- Milho = 0,90
- Ração = 1,00

As pressões adicionais para projeto de silos, com fluxo de massa, ocorrem na região de transição entre o corpo do silo e a tremonha, como pode ser visto na Figura 34:

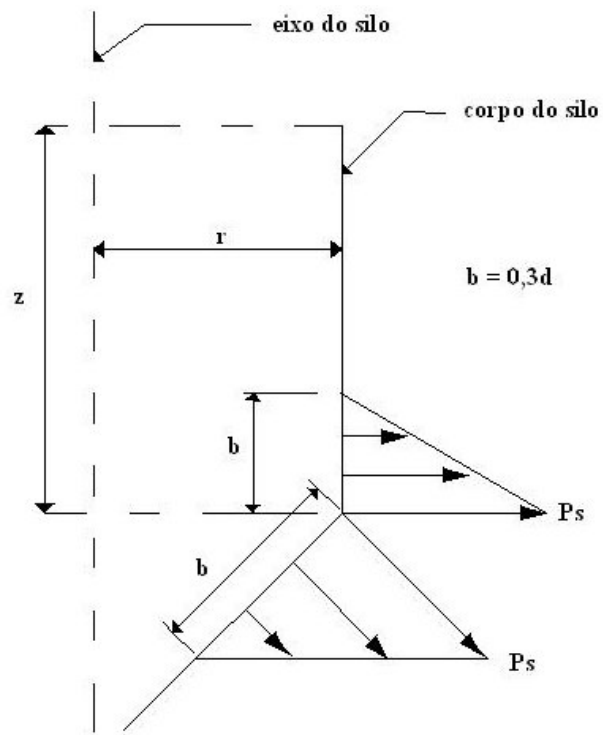


FIGURA 34 - Localização das sobrepressões em silos com fluxo de massa.
Fonte: Calil Jr et al. (1997).

O valor da sobrepressão é dado pelo menor valor das seguintes equações:

$$P_{s1} = \gamma z \quad (32)$$

$$P_{s2} = \gamma dc \quad (33)$$

Outra importante pressão que deve ser considerada para projeto de silos, segundo a norma DIN 1055 (1987), é a que ocorre no fundo do silo.

A norma alemã considera pressões que atuam em silos com fundo plano (inclinação da tremonha $< 20^\circ$) e pressões normais às paredes da tremonha (inclinação $\geq 20^\circ$).

Para o cálculo das pressões atuantes em silos de fundo plano, a norma faz distinção entre silos com relação altura/lado maior que 1,5 e silos com relação altura/lado menor que 1,5.

Para silos com relação altura/lado maior que 1,5, a pressão se apresenta distribuída uniformemente no fundo do silo e pode ser calculada por:

$$P_{vd}(z) = CbxPvc(z) \leq \gamma H \quad (34)$$

Em que $C_b = 1,5$ para todos os casos, exceto para produtos que propiciem a formação de abóbadas, para os quais $C_b = 1,8$.

Para silos com relação altura/lado menor que 1,5, a distribuição da pressão não pode ser considerada uniforme e a pressão vertical pode ser calculada por:

$$Pvd(z) = CbxPvc(z) \leq \gamma z \quad (35)$$

→ A profundidade Z será igual à altura da parede do silo e igual a $1,5 D$ no centro do silo.

Para o cálculo das pressões normais á parede do silo, existem duas fontes de pressão que devem ser consideradas:

- 1) Pressão normal devido ao produto dentro da tremonha (Figura 35);

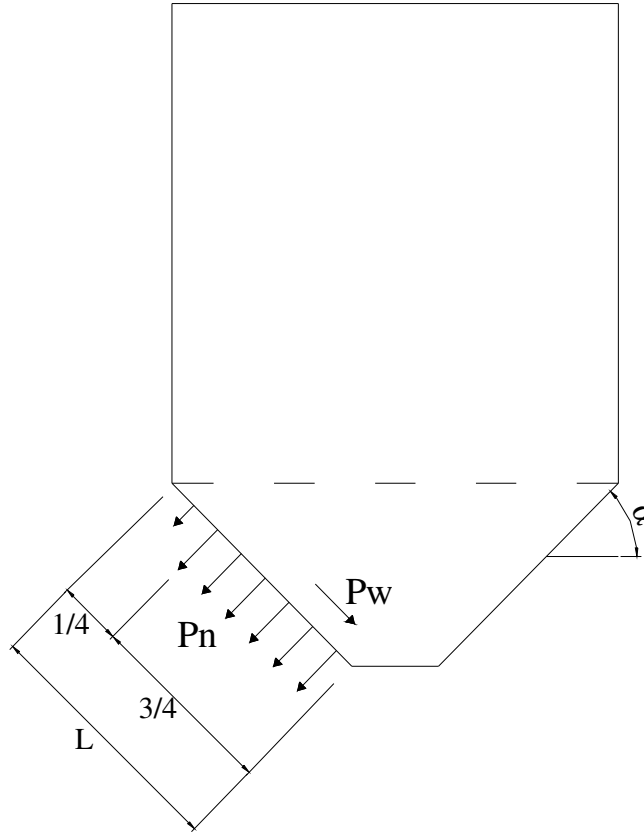


FIGURA 35 - Pressão normal às paredes devido ao produto dentro da tremonha.

Fonte: Adaptado Calil Jr. et al. (1997).

Sendo:

$$Pn = \frac{(2,4x\gamma R x Kx(\text{sen}^2 \alpha))}{((\mu')^{1/2})} \quad (36)$$

$$Pw = \frac{Pn}{2} \quad (37)$$

2) Pressão normal devido ao produto sobre a tremonha (Figura 36);

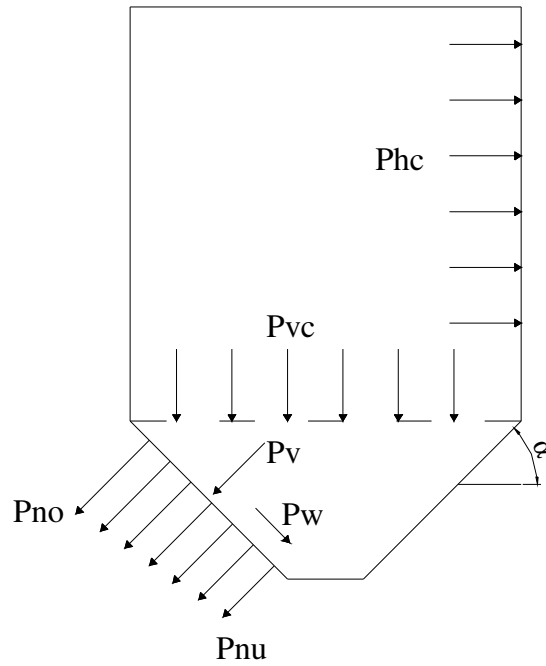


FIGURA 36 - Pressão normal devido ao produto sobre a tremonha.
 Fonte: Adaptado Calil Jr. et al. (1997).

Sendo:

$$P_{no} = (p_{vc} \times C_b \times \cos^2 \alpha + P_{hc} \times \sin^2 \alpha) \times \left(1 + \left(\frac{\sin 2\alpha}{4\mu}\right)\right) \quad (38)$$

$$P_{nu} = P_{vc} \times C_b \times \cos^2 \alpha \quad (39)$$

$$P_w = \frac{P_n}{2} \quad (40)$$

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi dividido em duas etapas. Na primeira foram determinadas as propriedades de fluxo do café cereja descascado. A segunda etapa consistiu na análise do fluxo do produto em modelos reduzidos.

O produto estudado foi o café (*coffea arábica*) cereja descascado, com 12 % de umidade (b.u.), sendo esta propriedade determinada pelo método da estufa.

A determinação das propriedades físicas e de fluxo do produto foi feita no laboratório de madeiras e estruturas de madeira (LAMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP) e no laboratório de estruturas e mecânica dos materiais da Universidade Federal de Lavras.

3.1 Determinação das propriedades físicas do café com pergaminho

As propriedades físicas e de fluxo determinadas foram:

- 1) Ângulo de atrito interno (ϕ_i);
- 2) Efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e);
- 3) Ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w);
- 4) Ângulo de repouso (ϕ_r) e
- 5) Função fluxo do produto (FF);

Para a determinação do ângulo de atrito interno, do efetivo ângulo de atrito interno e da Função Fluxo do produto, foram realizados ensaios preliminares, utilizando-se a metodologia proposta por Milani (1993). Entretanto, devido às características do produto analisado, foi necessária a utilização da metodologia proposta por Haaker (1999).

3.1.1 Determinação do ângulo de atrito interno (ϕ_i) e do efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)

A determinação do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno foi feita, utilizando-se a célula de cisalhamento TSG 70-140 (Figura 37), que segue o modelo da célula de Jenike. Este equipamento é composto por uma célula de cisalhamento de forma cilíndrica, dividida em um anel inferior e um superior, com 9 cm de diâmetro, que são preenchidos com a amostra do produto a ser cisalhada, um pendural com pesos para a aplicação da força vertical na amostra, uma haste para aplicação da força cisalhante, uma célula de carga para medir esta força e um registrador para indicação desta força.

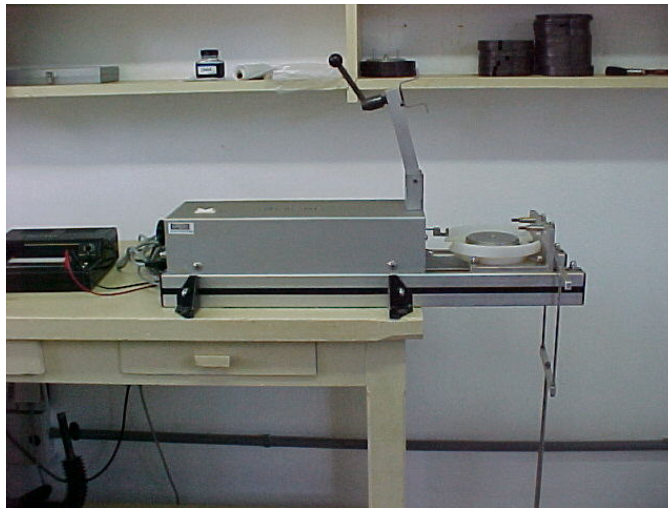


FIGURA 37 - Equipamento de cisalhamento TSG 70-140.

▪ **Metodologia de ensaio proposta por Milani (1993)**

1) Na primeira etapa a amostra é acomodada na célula de cisalhamento através de movimentos de giro na tampa, como mostrado na Figura 38. A quantidade de giros a ser utilizada varia de 25 a 35, em função do produto estudado. Produtos que se acomodam mais facilmente necessitam de 25 giros, produtos que apresentam uma característica de difícil acomodação necessitam de maior quantidade de giros. Geralmente, produtos com casca apresentam uma dificuldade maior para se acomodar, como arroz, café (com pergaminho), etc. Para a acomodação do café foram utilizados 35 giros.

2) Pré-cisalhamento: Esta etapa é feita para formação de um plano de cisalhamento e para levar o produto ao estado de fluxo estável, determinando o maior semicírculo de MOHR.

Primeiramente é aplicado um carregamento normal (σ_{pre}). Inicia-se a aplicação de uma força de arraste, que levará o produto confinado a aumentar sua densidade e, conseqüentemente, a sua resistência ao cisalhamento. Este aumento ocorre até um limite, quando a força de cisalhamento se estabiliza. Quando este ponto é atingido, o ensaio é interrompido e passa-se para a etapa de cisalhamento.

3) Cisalhamento: Nesta etapa, se determina o menor semicírculo de MOHR e, conseqüentemente, o lugar geométrico de deslizamento.

Após interromper o pré-cisalhamento é aplicada uma carga normal $\sigma < \sigma_{pre}$. Reinicia-se a ruptura da amostra aplicando uma força cisalhante no anel superior. Semelhante à etapa de pré-cisalhamento, a tensão necessária para romper a amostra aumenta, em função do aumento da densidade, atinge um valor máximo, correspondente à tensão de cisalhamento e diminui rapidamente. O ponto onde a tensão de cisalhamento é máxima é o ponto do lugar geométrico de deslizamento para este círculo de tensões.

As Figuras a seguir ilustram a seqüência de ensaio proposta por Milani (1993).

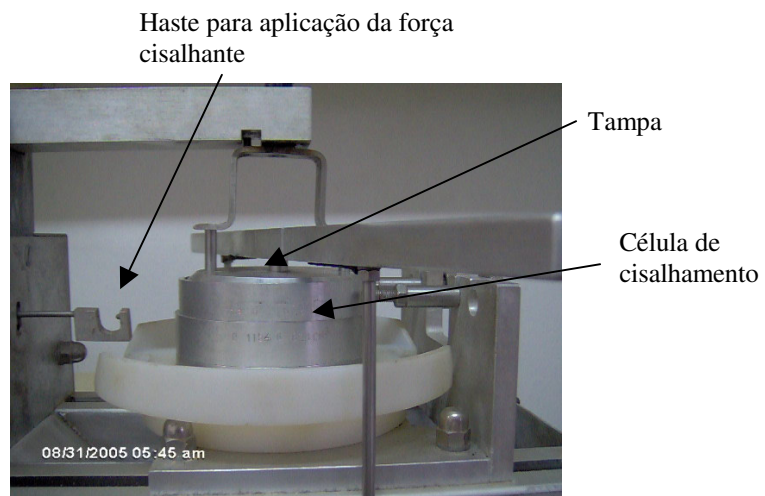
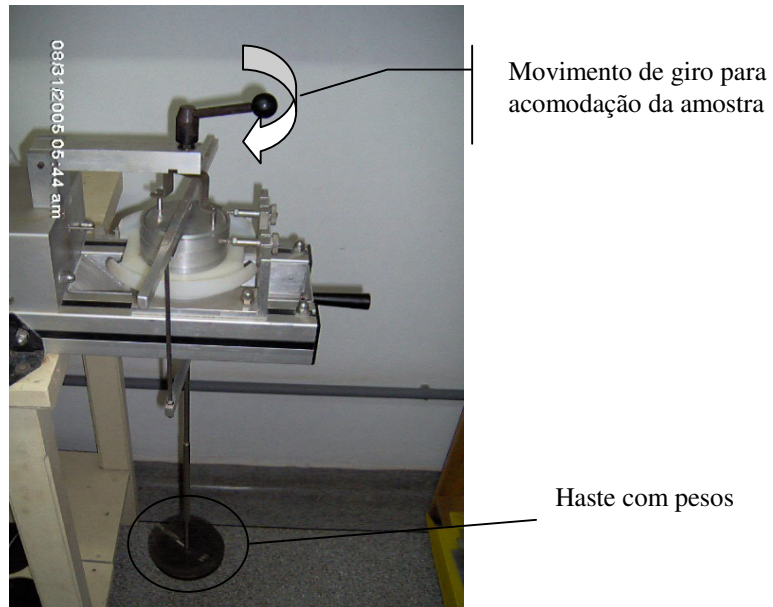


FIGURA 38 - Detalhe: (a) da etapa de acomodação da amostra e (b) Detalhe da célula de cisalhamento.

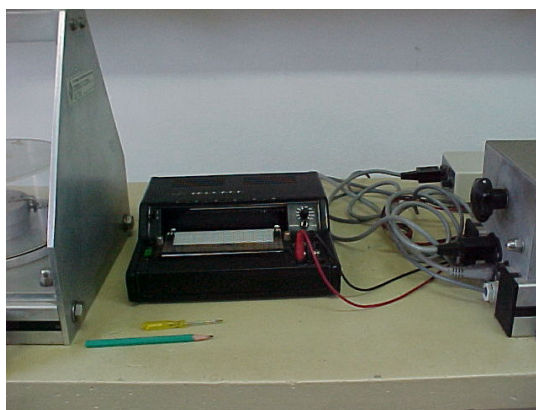


Substituição da tampa da etapa de acomodação da amostra para a tampa da fase de ruptura

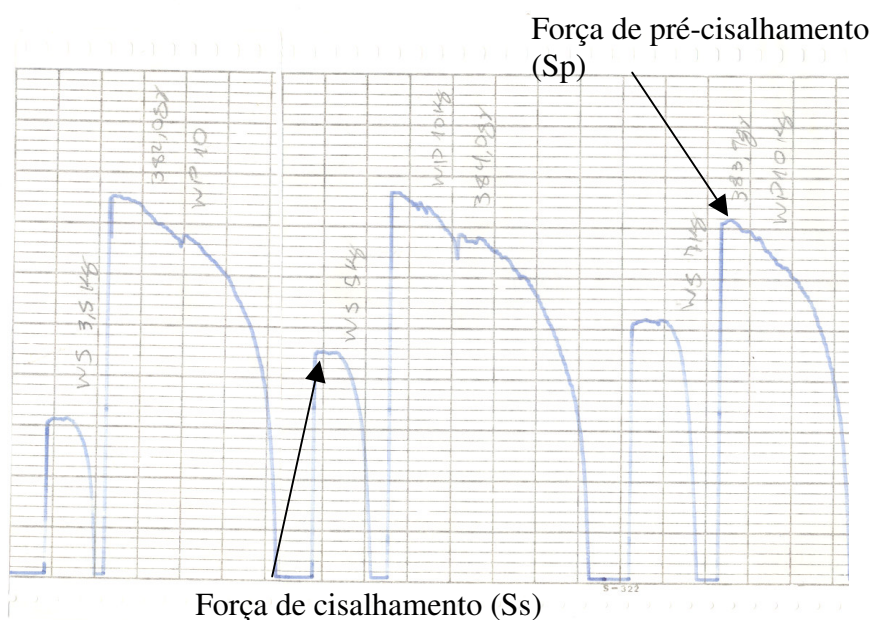
Haste com pesos

FIGURA 39 - Detalhe da etapa de pré-cisalhamento ou cisalhamento.

A força cisalhante necessária para arrastar o anel superior é acusada em um registrador (Figura 40).



(a)



(b)

FIGURA 40 - Foto (a) do registrador da força cisalhante e (b) do gráfico gerado pelo registrador.

Seguindo a metodologia proposta por Milani (1993), as seqüências de carregamentos que foram utilizadas nos ensaios estão mostradas na Tabela 3.

Entretanto, para seguir esta metodologia é necessário que, na etapa de pré-cisalhamento, o estado de fluxo estável seja alcançado, ou seja, a tensão de pré-cisalhamento deve alcançar um valor estável.

TABELA 3 - Seqüência de carregamento para a determinação do efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) e do ângulo de atrito interno (ϕ_i) (Milani, 1993):

Lugar geométrico 1		Lugar geométrico 2		Lugar geométrico 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

▪ **Metodologia de ensaio proposta por Haaker (1999).**

Segundo a metodologia proposta por Haaker (1999), na etapa de pré-cisalhamento, a amostra do produto que não se estabilizar, ou seja, não atingir o estado e fluxo estável, deverá ser cisalhada. Sendo assim, a seqüência de ensaio para esta metodologia é:

1) Acomoda-se a amostra com a carga de pré-cisalhamento, por exemplo, 100 N.

2) Leva-se a amostra ao cisalhamento, ainda com a carga de pré-cisalhamento.

3) Faz-se a substituição da amostra e da carga. Adotando sempre $\sigma_{pre} > \sigma_{cis.}$. E rompe-se novamente a amostra para a determinação dos menores semi-circulos de Mohr.

Com a utilização da metodologia proposta por Haaker (1999), consegue-se uma redução no tempo de ensaio, uma vez que com a determinação do maior semi-circulo, através da primeira etapa (pré-cisalhamento), é possível determinar

os outros semi-círculos sem a necessidade de se repetir o pré-cisalhamento. Sendo assim, a seqüência de carregamentos fica como mostrado na Tabela 4:

TABELA 4 - Seqüência de carregamento para a determinação do efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) e do ângulo de atrito interno (ϕ_i) (Haaker, 1999);

Lugar geométrico 1		Lugar geométrico 2		Lugar geométrico 3	
P_{pre}(N)	P (N)	P_{pre}(N)	P (N)	P_{pre}(N)	P (N)
	70		50		35
100	50	70	35	50	20
	35		20		10

Para cada uma das seqüências de carregamento, proposta pela metodologia, foram feitas 6 repetições, determinando um total de 18 ângulos de atrito interno (ϕ_i) e 18 efetivos ângulos de atrito interno (ϕ_e).

Todo lugar geométrico apresenta uma tensão de consolidação (σ_1) e uma tensão inconfina (σ_c), representadas pelas maiores tensões principais do maior e do menor semi-círculo de Mohr, respectivamente. A relação entre elas é representada pela função fluxo (FF), sendo assim, foram realizadas 18 determinações para a função fluxo do produto.

Foi utilizado o programa YIELD LOCUS.EXE para a determinação das propriedades. Um exemplo da utilização do programa é mostrado no Anexo 2. Neste programa, os dados de entrada são (Figura 41):

- Sp → Força registrada de pré-cisalhamento
- Ss → Força registrada de cisalhamento
- Wt → massa total da célula de cisalhamento
- Ws → Carregamento normal à célula de cisalhamento

```
Entre o nome do produto armazenado:          CAFÉ
Número de yield loci: 3
Número de Twisting: 35
Carga Normal de Twisting: 10

Yield Locus N°. : 2
Carga Normal de pré-shear: 10
Número de pré-shear: 3

Pré-shear N°. : 1
Entre a célula: S
Wt: 0.328 [kg]
Ws: 7 [kg]
Sp: 7 [N]
Ss: 6.4 [N]
```

FIGURA 41 - Dados de entrada do programa Yield locus.

Os dados de saída são:

- Ângulo de atrito interno,
- Efetivo ângulo de atrito interno,
- Função fluxo (FF),
- Massa específica.

3.1.2 Determinação do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno com o tempo de consolidação

Foram determinados o ângulo de atrito interno e o efetivo ângulo de atrito interno, considerando a influência de três tempos de consolidação: 6 horas, 12 horas e 48 horas. Foi utilizada nesta uma bancada de consolidação (Figura 42). A bancada de consolidação utilizada nos ensaios era composta de seis compartimentos; nestes compartimentos, é colocada a célula com a amostra a ser consolidada.

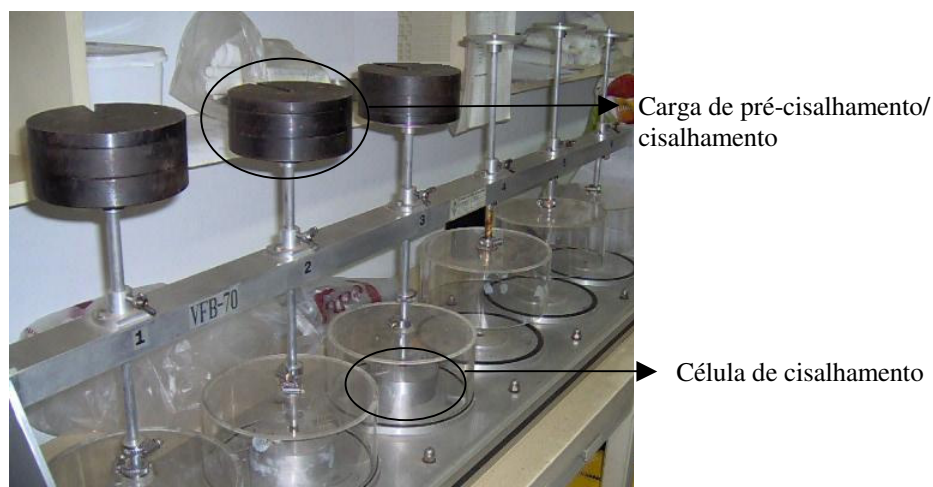


FIGURA 42 - Bancada de consolidação.

A seqüência de ensaio com o tempo de consolidação foi feita da seguinte maneira: primeiramente acomodou-se a amostra na célula de cisalhamento, utilizando-se 35 giros. A amostra acomodada com a devida carga, ou de pré-cisalhamento ou de cisalhamento, uma vez que foi utilizada a metodologia proposta por Haaker (1999), foi levada à bancada de consolidação. Após o tempo analisado, a amostra era retirada cuidadosamente da bancada e levada à máquina de cisalhamento para a ruptura.

As seqüências de carregamento utilizadas foram as mesmas propostas por Haaker (1999) e utilizadas para a determinação dos ângulos de atrito interno e dos efetivos ângulos de atrito interno instantâneos.

Foram realizadas 9 repetições para cada tempo de consolidação analisado. Para cada ensaio realizado, foi determinada uma função fluxo do produto.

3.1.3 Determinação do ângulo de atrito com a parede

Para a determinação do ângulo de atrito com a parede foi utilizada a mesma célula de cisalhamento anterior. Entretanto, substituiu-se o anel inferior por uma chapa do material da parede a ser analisada (Figuras 43 e 44). Foram analisados os materiais: aço liso, aço rugoso, madeira e acrílico.



FIGURA 43 - Determinação do ângulo de atrito com a parede.



FIGURA 44 - Diferentes materiais para confecção da parede do silo.

A condução do ensaio foi feita utilizando-se a metodologia proposta por Milani (1993). Para a determinação do lugar geométrico de deslizamento com a parede, a amostra é cisalhada sob diferentes carregamentos normais. A seqüência de carregamento utilizada foi 50 N, 40 N, 30 N, 20 N, 10 N e sem carga normal. Iniciou-se o ensaio com 50 N, a tensão de cisalhamento aumentou até um limite, diminuiu e se manteve constante. Aliviou-se 10 N, cisalhando a amostra com 40 N de carga normal. Aliviou-se novamente 10 N, cisalhando com 30 N de carga normal, assim sucessivamente. A Figura 45 ilustra as tensões de cisalhamento para cada tensão normal aplicada.

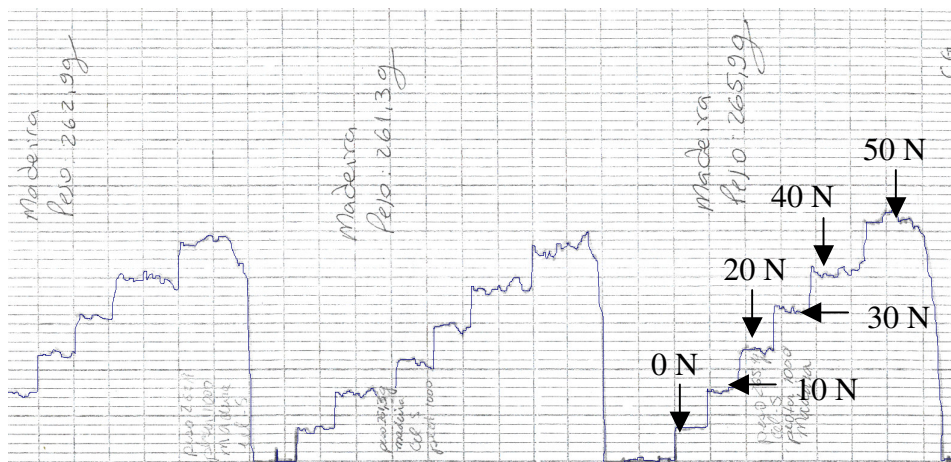


FIGURA 45 - Força registrada para cisalhar a amostra nos ensaios de cisalhamento com a parede

As rugosidades dos materiais ensaiados são mostradas na Tabela 5.

TABELA 5 - Rugosidade aparente dos materiais utilizados para a determinação dos ângulos de atrito com a parede (ϕ_w):

Material da chapa	Rugosidade aparente (μm)
Aço liso	11,6
Aço rugoso	14,8
Madeira	12,1
Acrílico	11,8

Fonte: Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras – EESC/USP

Foram realizadas seis repetições para cada uma das chapas estudadas. Assim como para a determinação do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno foi utilizado o programa YIELD LOCUS.EXE para a obtenção do ângulo de atrito com a parede; neste caso, os dados de entrada são mostrados na Figura 46 e o dado de saída é o ângulo de atrito com a parede.

```

Entre o nome do produto armazenado:          CAFÉ
Material:  Aço Rugoso
Entre com o peso Total Wt: 0,238 [kg]

Leitura 1: com 5 [kg]. Valor lido: 6
Leitura 2: com 4 [kg]. Valor lido: 5.4
Leitura 3: com 3 [kg]. Valor lido: 3.9
Leitura 4: com 2 [kg]. Valor lido: 2.5
Leitura 5: com 1 [kg]. Valor lido: 1.2
Leitura 6: com 0 [kg]. Valor lido: 0.5
    
```

FIGURA 46 - Dados de entrada no programa yield locus para a determinação do Ângulo de atrito com a parede

3.1.4 Determinação do ângulo de repouso

Para a determinação do ângulo de repouso foi utilizado o equipamento mostrado na Figura 47, sendo realizadas 12 repetições. Neste equipamento, o produto analisado é armazenado em um compartimento suspenso. Após abrir a boca de descarga, o produto cai sobre uma superfície circular com 13,25 cm de raio. O produto forma um talude natural. Mede-se então a altura do talude. O ângulo de repouso é dado por:

$$\arctg\left(\frac{H}{13,25}\right) = \phi_r$$

Onde:

H = Altura do talude natural (cm)



FIGURA 47 - Aparelho utilizado para a determinação do ângulo de repouso.

3.1.5 Determinação estatística dos valores limites inferior e superior das propriedades

Com o intuito de se determinarem os limites superiores e inferiores do ângulo de atrito interno, do efetivo ângulo de atrito interno, do ângulo de atrito do produto com a parede e do ângulo de repouso, foi necessário fazer uma análise exploratória dos valores determinados para cada propriedade. Esta análise consiste em determinar valores limites, ou seja, valores maiores ou menores destes podem ser descartados. Esta análise foi feita utilizando o gráfico de caixas (Figura 48).

A metodologia para a confecção do gráfico consiste em desenhar uma caixa onde as extremidades são os quartos e a mediana sendo representada por uma barra no meio da caixa. A determinação dos quartos é feita tomando a profundidade da mediana, ou seja, sua posição, dividir este valor por dois e subtrair e adicionar à profundidade da mediana, determinando assim os quartos inferiores e superiores, respectivamente.

Para a determinação dos limites superiores e inferiores é determinado o índice d_f , este índice é multiplicado por $3/2$, o resultado é adicionado ao quarto superior para determinar o limite superior e subtraído do quarto inferior para se determinar o limite inferior.

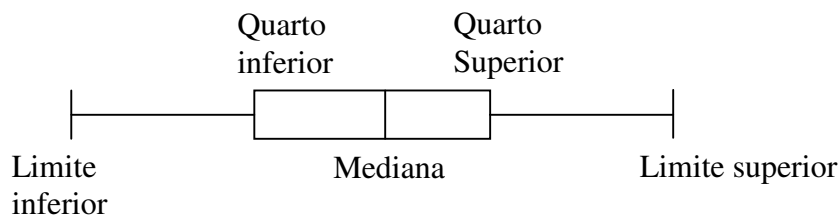


FIGURA 48 - Gráfico de caixas.

Em termos de projetos, a utilização de valores médios para a função fluxo do produto é recomendada. Sendo assim, a análise realizada foi a comparação entre os valores determinados para os diferentes tempos de consolidação, o que permitiu avaliar a influência destes no comportamento de fluxo do produto.

3.2 Análise do fluxo do produto em silos protótipos

Para confirmar a veracidade das propriedades obtidas e analisar o fluxo do café foram confeccionados 2 silos protótipos de acrílico (Figura 49), cujo projeto é mostrado no Anexo 1.

Foi feito um silo com seção quadrada e um silo com seção circular. O silo com seção quadrada (Corpo do silo = 40 cm x 40 cm x 40 cm) foi montado com uma tremonha na forma de tronco de pirâmide com uma inclinação de 45° e com uma boca de descarga de 5 cm de lado. O silo de seção circular (corpo do silo = 40 cm de diâmetro e 40 cm de altura) foi montado com tremonha cônica de 60° de inclinação e com uma boca de descarga de 5 cm de diâmetro.



FIGURA 49 Silos protótipo de acrílico.

Foi realizada, em cada um dos silos, uma análise do padrão de fluxo que ocorre na descarga de dois produtos: areia e o café cereja descascado.

Primeiramente, foram analisados os padrões de fluxo da areia, uma vez que suas propriedades já são conhecidas e citadas por diversos autores e normas. Neste trabalho, foram utilizadas as propriedades citadas pela norma australiana (Australian Standard, 1996), que estão de acordo com outras normas, sendo estes 15° e 22° para os limites inferior e superior do ângulo de atrito da areia com o acrílico, respectivamente. A norma alemã apresenta apenas o valor de 22° para o ângulo de atrito da areia com paredes de superfícies lisas; desta forma, a utilização do intervalo proposto pelas normas australiana e inglesa trarão maior confiabilidade para o trabalho. Para facilitar a análise do fluxo, os silos foram preenchidos em camadas, alternando entre areia e uma camada com areia tingida, conforme mostrado na Figura 50. Os padrões de fluxo (massa ou funil), obtidos nos ensaios, foram comparados com os gráficos propostos pela norma DIN 1055. A determinação dos padrões de fluxo da areia serviu para comprovar a utilização dos silos modelos nos ensaios.



FIGURA 50 - Preenchimento em camadas para análise do fluxo.

Outra importante característica que foi determinada para análise do fluxo do produto foi o fator fluxo da tremonha (*ff*). O fator fluxo da tremonha foi determinado para os dois modelos, usando o produto café. O modelo teórico de referência foi o proposto por Enstad (1975).

Os padrões de fluxo, observados nos ensaios com os silos modelos, foram comparados com o padrão de fluxo determinado pelas propriedades físicas do produto, podendo desta forma comprovar a utilização das propriedades em projetos de silos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades físicas do café

Os resultados obtidos nos ensaios para a determinação do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno são mostrados na Tabela 6. Pode-se observar que há uma variação muito grande nos valores determinados para a função fluxo do produto café. Isto pode ser explicado pela interferência da casca (pergaminho), uma vez que esta dificulta a acomodação da amostra.

Como descrito anteriormente, a utilização de valores médios da função fluxo é recomendada, sendo assim para o café, considerando os ensaios instantâneos, pode-se adotar $FF = 9$. Desta forma, o café pode ser classificado como um produto que flui facilmente, conforme Jenike (1964).

No que diz respeito aos valores determinados para o ângulo de atrito interno (ϕ_i) e para o efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e), o gráfico de caixas não demonstrou discrepâncias. Sendo assim, pode-se definir os valores superiores e inferiores como: 27° e 36° para o ângulo de atrito interno e 31° e 40° para o efetivo ângulo de atrito interno.

TABELA 6 - Resultados obtidos dos ângulos de atrito interno (ϕ_i) e efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) para os diferentes carregamentos nas diferentes repetições:

Seqüência de carregamento (N)	ϕ_i (°)	ϕ_e (°)	σ_1 (kPa)	σ_c (kPa)	FF	
100	70; 50; 35	36	37	30,11	5,16	5,83
	70; 50; 35	34	37	31,22	6,98	4,47
	70; 50; 35	35	36	30,41	5,04	6,03
	70; 50; 35	36	37	29,85	5,52	5,40
	70; 50; 35	36	37	28,46	7,97	3,57
	70; 50; 35	32	37	31,88	8,18	3,89
70	50; 35; 20	34	40	16,28	1,06	15,35
	50; 35; 20	34	39	17,55	1,25	14,04
	50; 35; 20	31	38	18,00	3,98	4,52
	50; 35; 20	27	39	14,57	5,8	2,51
	50; 35; 20	35	40	17,26	0,32	53,93
	50; 35; 20	36	39	20,29	0,77	26,35
50	35; 20; 10	31	34	14,58	4,57	3,19
	35; 20; 10	27	32	13,79	4,71	2,92
	35; 20; 10	32	33	13,82	4,49	3,07
	35; 20; 10	31	33	14,63	3,76	3,89
	35; 20; 10	27	31	12,99	5,38	2,41
	35; 20; 10	31	32	13,53	3,9	3,47

Onde: σ_{pre} → Carga de pré-cisalhamento (determinação do maior semi-circulo de Mohr); σ_s → Carga de cisalhamento (determinação dos menores semi-círculos de MOHR); ϕ_i → ângulo de atrito interno (graus); ϕ_e → efetivo ângulo de atrito interno; σ_1 → Tensão de consolidação; σ_c → Tensão confinada e FF → representação da Função Fluxo.

A Tabela 7 mostra os valores determinados para os ângulos de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno, assim como as respectivas tensões de consolidação e de ruptura e os valores de representação da função fluxo, para os diferentes tempos de consolidação estudados.

Para o tempo de consolidação de 6 horas, o gráfico de caixas não apresentou valores extremos para o ângulo de atrito interno e para o efetivo ângulo de atrito interno, sendo assim, os valores limites são: 32° e 37°; 36° e 39°, para o ângulo de atrito interno e para o efetivo ângulo de atrito interno, respectivamente. Quanto à função fluxo do produto, o valor médio determinado foi de 5,34, o que caracteriza este produto como um produto que flui facilmente; entretanto, pode se observar uma tendência à consolidação com o tempo de armazenamento, já que houve uma diminuição no seu valor, quando comparado ao valor instantâneo.

Para o tempo de consolidação de 12 horas, também não houve discrepância entre os valores determinados para o ângulo de atrito interno e para o efetivo ângulo de atrito interno, sendo assim seus valores limites são: 31° e 37°; 33° e 41°, respectivamente. Para a função fluxo do produto, o valor médio determinado foi de 5,06. Este valor ainda caracteriza o produto como um produto que flui facilmente, mais ainda continua uma tendência à consolidação.

Para o tempo de 48 horas, os limites determinados para o ângulo de atrito interno foram 28° e 36°. Para o efetivo ângulo de atrito interno, os limites apresentados foram 32° e 42°. Para a função fluxo do produto, o valor médio determinado foi de 2,69. Este valor caracteriza o produto como sendo um produto coesivo. Desta forma, podemos comprovar a influência do tempo de armazenamento nas características de fluxo do café.

TABELA 7 - Resultados obtidos dos ângulos de atrito interno (ϕ_i) e efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) para os diferentes carregamentos e tempos de consolidação.

Tempo (horas)	Seqüência de carregamento (N)	ϕ_i (°)	ϕ_e (°)	σ_1 (kPa)	σ_c (kPa)	FF	
6	100	70; 50; 35	33	36	26,81	7,33	3,65
		70; 50; 35	34	36	26,23	7,45	3,52
		70; 50; 35	35	37	26,80	7,18	3,73
	70	50; 35; 20	32	39	23,43	3,12	7,50
		50; 35; 20	33	37	24,12	3,59	6,71
		50; 35; 20	32	38	23,71	3,87	6,12
	50	35; 20; 10	36	39	21,12	3,97	5,31
		35; 20; 10	37	38	21,93	3,68	5,95
		35; 20; 10	35	39	20,97	3,75	5,59
12	100	70; 50; 35	34	34	26,77	5,60	4,78
		70; 50; 35	31	33	26,17	7,76	3,37
		70; 50; 35	32	33	26,14	6,06	4,32
	70	50; 35; 20	36	37	22,87	3,49	6,55
		50; 35; 20	34	37	22,78	4,83	4,71
		50; 35; 20	36	38	22,27	4,96	4,48
	50	35; 20; 10	36	40	20,13	3,89	5,17
		35; 20; 10	36	40	19,93	3,61	5,52
		35; 20; 10	37	41	20,12	3,16	6,36
48	100	70; 50; 35	31	34	26,55	8,78	3,02
		70; 50; 35	31	32	26,13	7,88	3,31
		70; 50; 35	33	34	26,11	7,94	3,28
	70	50; 35; 20	28	39	23,90	10,90	2,19
		50; 35; 20	32	39	24,15	9,25	2,61
		50; 35; 20	32	40	25,09	8,42	2,97
	50	35; 20; 10	33	40	17,01	8,39	2,02
		35; 20; 10	34	41	18,01	7,51	2,39
		35; 20; 10	36	42	18,34	7,34	2,49

Onde: σ_{pre} → Carga de pré-cisalhamento (determinação do maior semi-círculo de Mohr); σ_s → Carga de cisalhamento (determinação dos menores semi-círculos de MOHR); ϕ_i → ângulo de atrito interno (graus); ϕ_e → efetivo ângulo de atrito interno; σ_1 → Tensão de consolidação; σ_c → Tensão inconfínada e FF → representação da Função fluxo.

Os resultados dos ensaios para a determinação do ângulo de atrito com a parede estão mostrados na Tabela 8.

TABELA 8 - Resultados determinados para o ângulo de atrito do café cereja descascado com diferentes materiais para a parede do silo.

MATERIAL	Repetição	ϕ_w (°)	M'
Aço rugoso	1	18	0,325
	2	17	0,305
	3	16	0,286
	4	16	0,286
	5	16	0,286
	6	18	0,325
Aço liso	1	15	0,268
	2	14	0,249
	3	14	0,249
	4	15	0,268
	5	16	0,286
	6	16	0,286
Madeira	1	16	0,286
	2	16	0,286
	3	15	0,268
	4	17	0,305
	5	18	0,325
	6	16	0,286
Acrílico	1	14	0,249
	2	13	0,230
	3	13	0,230
	4	14	0,249
	5	15	0,268
	6	13	0,230

Como podem ser observados na tabela anterior, os limites inferior e superior do ângulo de atrito do café com aço liso é 16° e 18° respectivamente. Os limites encontrados para a madeira foram de 15° e 18°. Para o acrílico, foram 13° e 15° e para o aço liso, foram de 14° e 16°. Estes limites estão de acordo com a rugosidade apresentada pelos materiais testados, com exceção feita apenas para

o aço liso e acrílico, uma vez que a rugosidade apresentada pelo acrílico é maior do que a que apresenta a chapa de aço liso; entretanto, os valores apresentados do ângulo de atrito do café com aço liso foram maiores do que os apresentados para o acrílico. Isto pode ser explicado pela pequena diferença entre as rugosidades dos dois materiais, o que acarreta em uma proximidade dos valores determinados.

A Tabela 9 mostra os resultados dos ensaios para a determinação do ângulo de repouso do café.

TABELA 9 - Valores determinados para o ângulo de repouso (ϕ_r).

Repetição	Altura do talude (cm)	Ângulo de repouso (ϕ_r) (°)
1	8,5	32,68
2	8	31,12
3	7,8	30,48
4	7,8	30,48
5	7,6	29,83
6	7,5	29,51
7	8,1	31,43
8	7,9	30,80
9	7,8	30,48
10	7,7	30,16
11	7,8	30,48
12	7,9	30,80

Os valores dos limites determinados para o ângulo de repouso foram 29,51° e 32,68°. Esta diferença é estatisticamente aceitável, comprovada pela análise do gráfico de caixas, podendo então ser adotados em termos de projeto.

4.2 Análise de fluxo em silos protótipos

4.2.1 Protótipo de seção quadrada

Para análise de fluxo foi adotada a norma australiana (Australian Standard, 1996), que apresenta os valores de 15° e 22° como os limites para o ângulo de atrito da areia com produtos de superfície lisa, como o acrílico.

O fluxo da areia, levando em consideração a norma DIN 1055 (1987), pode se apresentar como mostrado na Figura 51, ou seja, não tendo um padrão definido, podendo ocorrer fluxo de massa ou fluxo de funil. Entretanto, como pode ser visto nas Figuras 52 e 53, o padrão de fluxo apresentado no ensaio com o modelo pode ser considerado como fluxo de funil, uma vez que houve a formação de zonas estagnadas, próximas à boca de descarga e pode ser visualizado um funil bem definido no centro do silo.

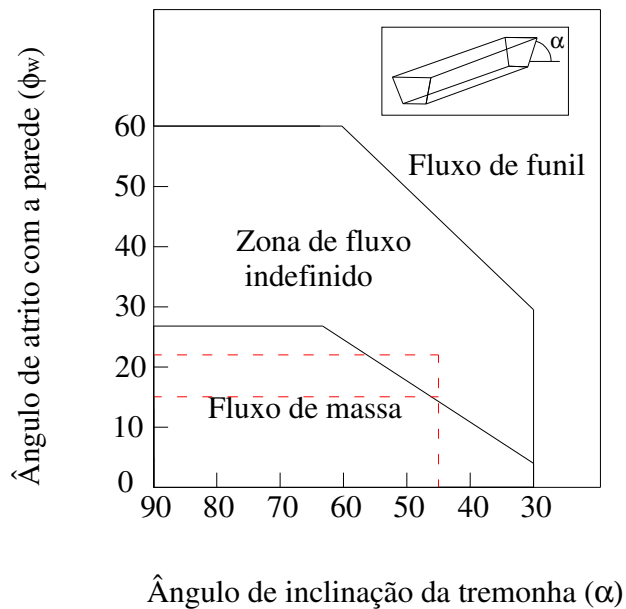


FIGURA 51 - Padrão de fluxo conforme a norma DIN 1055 (1987).

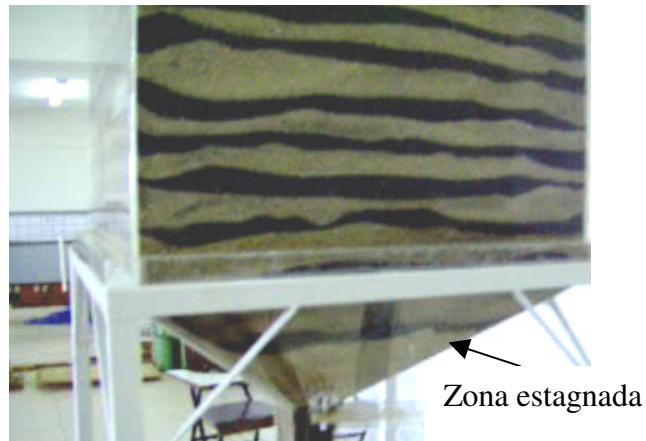


FIGURA 52 - Indicação de uma região sem fluxo no início da descarga.

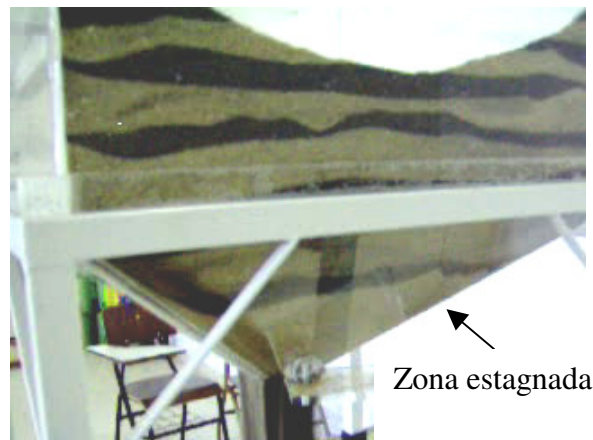


FIGURA 53 - Indicação de uma região sem fluxo no final da descarga.

Considerando os limites inferior e superior do ângulo de atrito do café com o acrílico de 13° e 15° , respectivamente, conforme a norma alemã poderá ocorrer tanto o fluxo de massa, quanto o fluxo de funil, Figura 54. Entretanto, os ensaios realizados mostraram a tendência de ocorrer um fluxo de funil, como mostrado na Figura 55.

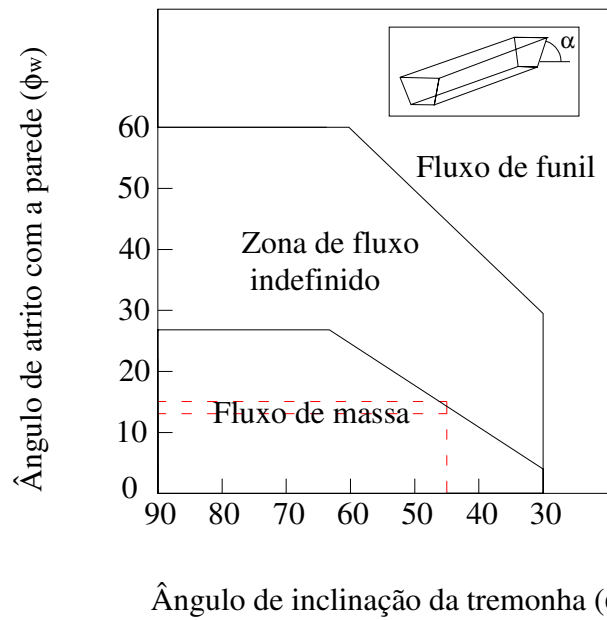


FIGURA 54 - Possíveis padrões de fluxo que podem ocorrer na descarga de café de um silo de acrílico com 45° de inclinação da tremonha.

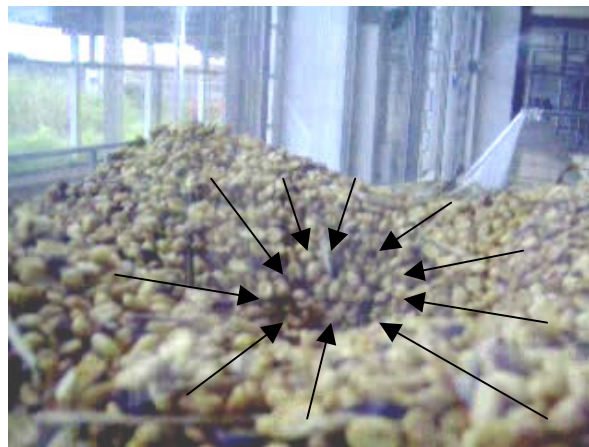


FIGURA 55 - Formação de um funil durante a descarga de café do silo protótipo retangular.

Para o silo com seção retangular o fator fluxo da tremonha é dado como a seguir:

$$F(\alpha) = \left(\frac{65}{130 + \alpha} \right)^m \times \left(\frac{200}{200 + \alpha} \right)^{1-m} = \left(\frac{65}{130 + 45} \right)^1 \times \left(\frac{200}{200 + \alpha} \right)^{1-1} = 0,37$$

$$2x\beta = \phi_{ws} + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}\phi_{ws}}{\text{sen}\phi_{es}} \right) = 15^\circ + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}15^\circ}{\text{sen}42^\circ} \right) = 37,75^\circ \longrightarrow \beta = 18,87^\circ$$

$$\theta = \beta + \alpha = 18,87 + 45 = 63,87$$

$$X = \frac{2^m \cdot \text{sen}\phi_{es}}{1 - \text{sen}\phi_{es}} \times \left[\frac{\text{sen}(\beta + \theta)}{\cos(90 - \alpha)} + 1 \right] = \frac{2^1 \cdot \text{sen}42^\circ}{1 - \text{sen}42^\circ} \times \left[\frac{\text{sen}(\beta + \theta)}{\cos(90 - \alpha)} + 1 \right] = 9,69$$

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

$$\frac{[2x(1 - \cos 63,87)]^1 \times 63,87^{1-1} \times \cos(90 - 45) + \text{sen}18,87 \times (\text{sen}63,87)^{1+1}}{(1 - \text{sen}42) \times (\text{sen}63,87)^{2+1}} = 4,30$$

$$ff = \frac{Yx(1 + \text{sen}\phi_{es})}{2x(X - 1) \times F(\alpha) \times \cos(90 - \alpha)} = \frac{4,30 \times (1 + 0,66)}{2 \times (9,69 - 1) \times 0,37 \times \cos(45)} = 1,58$$

Tendo determinado o fator fluxo da tremonha e a Função Fluxo do produto, foi feita a análise da tensão crítica para a determinação da dimensão mínima da boca de descarga. Tal análise foi realizada, utilizando-se o critério de fluxo ou não fluxo, conforme descrito no item 2.3.2.2. Os valores utilizados para a função fluxo do produto café foram os valores médios determinados para os

ensaios instantâneos e para os tempos de consolidação de 6 horas, 12 horas e 48 horas respectivamente.

A reta que representa o fator fluxo da tremonha (ff) passa pela origem com inclinação igual à cotangente de $1/1,58$.

O gráfico mostrado na Figura 56 ilustra o critério de fluxo ou não fluxo que compara a função fluxo do produto com o fator fluxo da tremonha. Pode ser observado no gráfico que, com 48 horas, é a situação em que se apresenta a maior tensão crítica. Desta forma, pode ser definido que o tempo de consolidação interfere no projeto de silos para café.

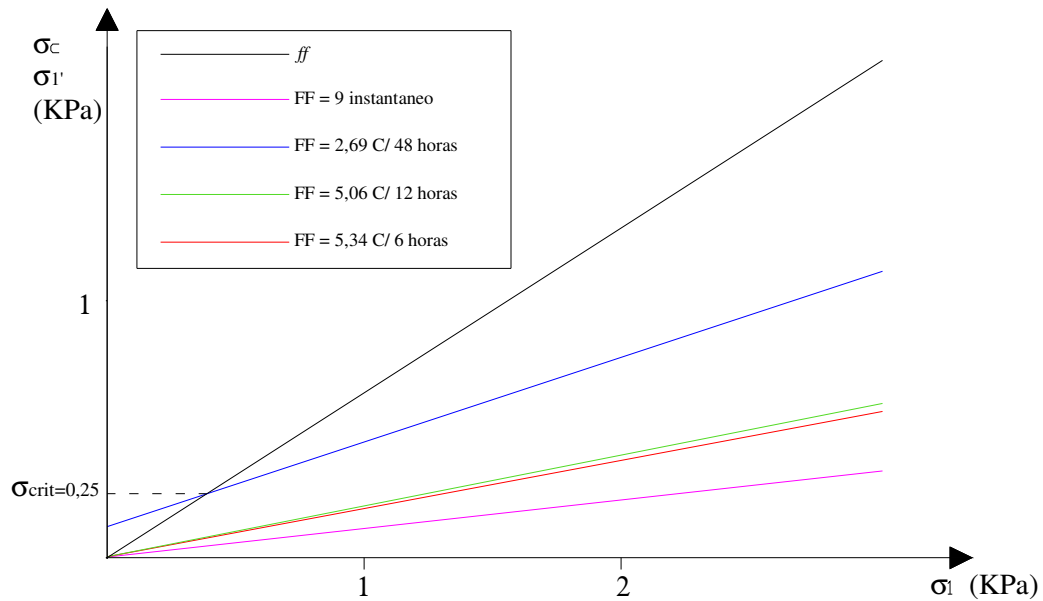


FIGURA 56 - Gráfico fluxo ou não fluxo para o silo de acrílico com seção retangular.

4.2.2 Silo modelo com seção circular

Segundo a norma DIN 1055 (1987), pode ocorrer qualquer padrão de fluxo, quando se descarrega areia de dentro de um silo com a superfície de acrílico e tremonha cônica com inclinação de 60° , como mostrado na Figura 57. O ensaio realizado no modelo apresentou uma tendência de fluxo de massa (Figuras 58 e 59).

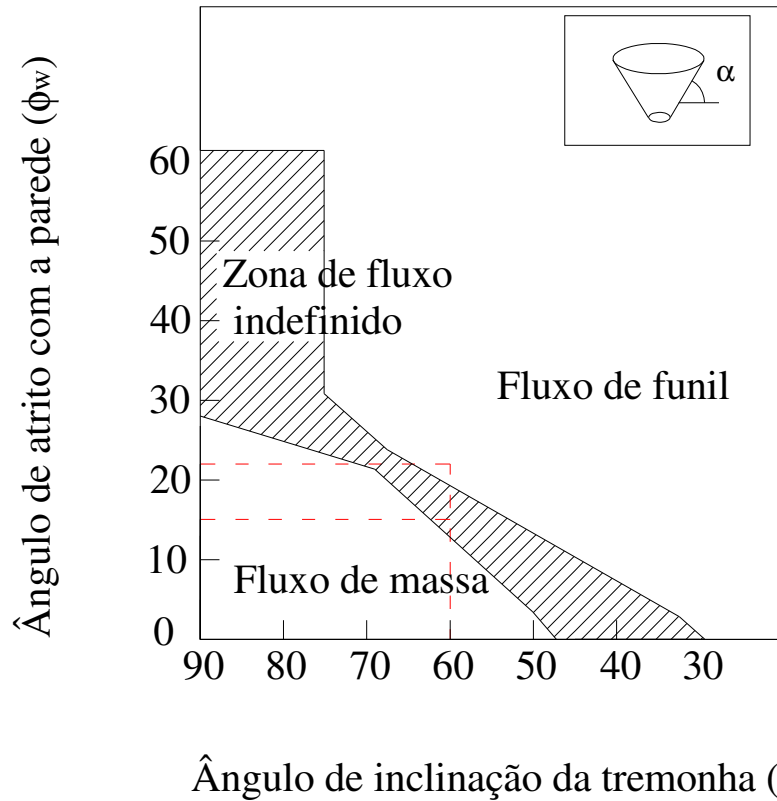


FIGURA 57 - Possíveis padrões de fluxo que podem ocorrer na descarga de areia de um silo de acrílico com 60° de inclinação da tremonha segundo a norma DIN 1055 (1987).



FIGURA 58 - Indicação da posição do produto no início do fluxo.



FIGURA 59 - Indicação da posição do produto durante o fluxo.

Segundo a norma DIN 1055 (1987), também há indefinição no padrão de fluxo que deve apresentar o café em pergaminho, nas mesmas condições de armazenamento, como mostrado no gráfico da Figura 60. Nas Figuras 61 e 62 pode ser observado que toda a massa de grão flui uniformemente, o que caracteriza o fluxo de massa.

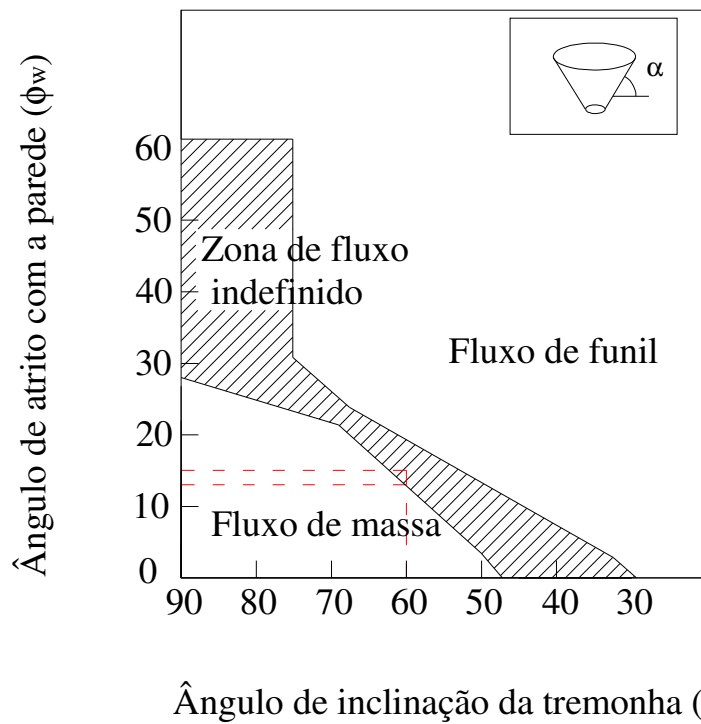


FIGURA 60 - Possíveis padrões de fluxo que podem ocorrer na descarga de areia de um silo de acrílico com 60° de inclinação da tremonha segundo a norma DIN 1055 (1987).



FIGURA 61 - Caracterização da superfície da massa de grãos no início do fluxo de massa.



FIGURA 62 - Caracterização da superfície da massa de grãos durante o fluxo de massa.

Para as condições de armazenamento de café com pergaminho em silos de acrílico com tremonha cônica de 60°, o fator fluxo da tremonha é dado por:

$$F(\alpha) = \left(\frac{65}{130 + \alpha} \right)^m x \left(\frac{200}{200 + \alpha} \right)^{1-m} = \left(\frac{65}{130 + 60} \right)^1 x \left(\frac{200}{200 + 60} \right)^{1-1} = 0,34$$

$$2x\beta = \phi_{ws} + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}\phi_{ws}}{\text{sen}\phi_{es}} \right) = 15^\circ + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}15^\circ}{\text{sen}42^\circ} \right) = 37,75^\circ \longrightarrow \beta = 18,87^\circ$$

$$\theta = \beta + \alpha = 18,87 + 45 = 63,87$$

$$X = \frac{2^m x \cdot \text{sen}\phi_{es}}{1 - \text{sen}\phi_{es}} \left[\frac{\text{sen}(\beta + \theta)}{\cos(90 - \alpha)} + 1 \right] = \frac{2^1 x \text{sen}42^\circ}{1 - \text{sen}42^\circ} \left[\frac{\text{sen}(18,87 + 63,87)}{\cos(90 - 60)} + 1 \right] = 8,66$$

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

$$\frac{[2x(1 - \cos 63,87)]^1 x 63,87^{1-1} x \cos(90 - 60) + \text{sen}18,87 x (\text{sen}63,87)^{1+1}}{(1 - \text{sen}42) x (\text{sen}63,87)^{2+1}} = 4,25$$

$$ff = \frac{Yx(1 + \text{sen}\phi_{es})}{2x(X - 1)x F(\alpha) x \cos(90 - \alpha)} = \frac{4,25x(1 + 0,66)}{2x(8,66 - 1)x 0,34 x \cos(30)} = 1,56$$

Assim como para o silo de seção retangular pode ser observado, no gráfico da Figura 63, que a situação que oferece o maior valor para a tensão crítica é a representada pela função fluxo para o tempo de consolidação de 48 horas.

A reta, que representa o fator fluxo da tremonha (ff), é traçada passando pela origem com uma inclinação correspondente à cotangente 1/1,56 .

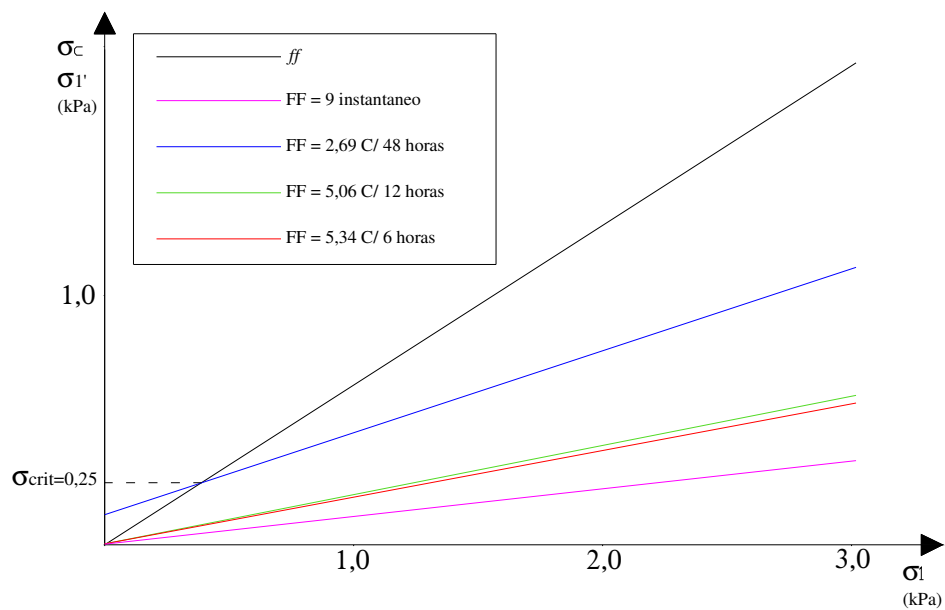


FIGURA 63 - Gráfico do fluxo ou não fluxo para o silo de seção circular.

5 CONCLUSÃO

Deste trabalho, pode-se concluir que o produto café cereja descascado, com teor de água igual a 12 % b.u., apresenta um comportamento característico comum aos produtos que possuem casca, ou seja, difícil estabilização na etapa de pré-cisalhamento.

Os limites inferiores e superiores para o ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno instantâneos foram: 27° e 36° e 31° e 40°.

Os limites inferiores e superiores para o ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno com o tempo de consolidação de 6 horas foram: 32° e 37° e 36° e 39°, respectivamente.

Os limites inferiores e superiores para o ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno com o tempo de consolidação de 12 horas foram: 31° e 37° e 33° e 41°, respectivamente.

Os limites inferiores e superiores para o ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno com o tempo de consolidação de 48 horas são: 28° e 36° e 32° e 42°.

Em função dos valores apresentados para a função fluxo (FF), em média $FF = 9$, o café cereja descascado pode ser considerado um produto que flui facilmente, embora possa apresentar problemas de obstruções no fluxo, com o tempo de consolidação no armazenamento.

Os limites do ângulo de repouso foram 29,51° e 32,68°.

Os limites do ângulo de atrito com a parede foram: 16° e 18° para o aço rugoso; 14° e 16° para o aço liso; 15° e 18° para a madeira e 13° e 15° para o acrílico.

Como material conclusivo é mostrado em anexo (Anexo 3), algumas recomendações para projetos de silo para café estudado.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUSTRALIAN STANDART. **AS 3774: Loads on Bulk Containers.** Commentary. Sydney, 1996. 62 p.

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

CALIL Jr., C. **Recomendações de fluxos e de cargas para o projeto de silos verticais.** 1990. 198 p. Tese de livre docência. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

CANADIAN FARM BUILDING CODE - CFBC. Ottawa. National research council of Canada, 1983. 25 p.

DIN 1055. Lastannahmen fur Bauten. Alemanha, 1987. 12 p. Blatt 6, *Lasten in Silozellen.*

DINIZ, M. J. **Predição do fluxo de bentonita em silos verticais.** 2005. 162 p. Tese (Doutorado em Engenharia de processos) – Universidade federal de Campina Grande Centro de Ciências e Tecnologia. Campina Grande, PB.

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

EUROCODE 1. **Actions on silos and tanks:** part 4. Bruxelas, 1991.

GAYLORD, JR. 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- SP.

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

INTERNATIONAL STANDART. **ISO – 11697**: *Bases for design of structures: Loads due to bulk materials*, 1995.

JANSSEN , H. A. *Verusche über Getreidedruck in Silozellen*. **Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure**, v. 15, n. 3, p. 369-383, 1995.

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

JENIKE, A. W. *Storage and flow of silos*. Salt Lake City: University of Utah, 1980. 197 p.

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). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

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

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

SCHULZE, D. *Measurement of the flowability of bulk solids*. In: BROWN, C. J.; NIELSEN, (Ed.). *Silos: Fundamentals of theory, behavior and design*. London – NY: E & FN Spon, 1998. p.18-52.

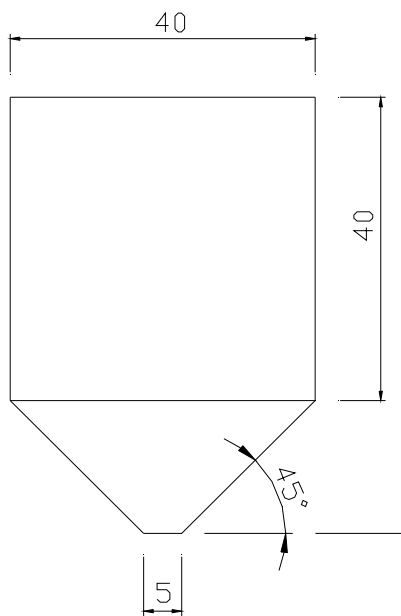
SILVA, E.T. *Elementos pré moldados para silos quadrados de concreto armado*. 1998. 178 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade de Campinas, Campinas. SP.

TOSELLO, A. *Colheita e preparo via seca e armazenamento de café*. In: INSTITUTO AGRONÔMICO DO ESTADO DE SÃO PAULO, **1º curso de cafeicultura de 1954**. 3ª ed. Campinas, SP, 1957. p. 249-265.

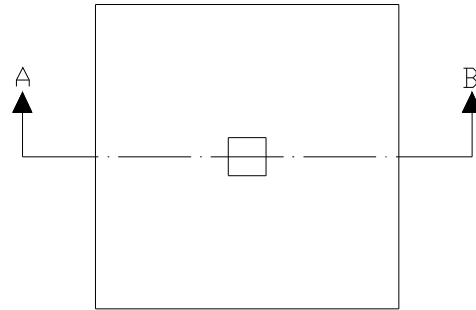
7 ANEXOS

7.1 Anexo 1: projeto dos silos protótipos

- Silo de seção quadrada

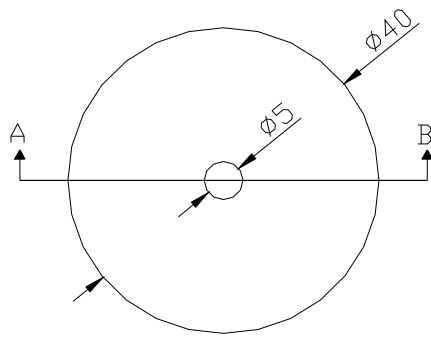


Corte AB
Esc.: 1:10
Unid.: cm

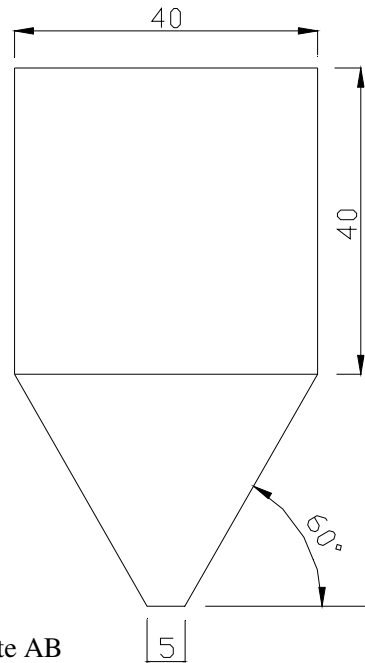


Vista superficial
Esc.: 1:10
Unid.: cm

- Silo de seção circular



Vista Superior
Esc.: 1:10
Unid.: cm



Corte AB
Esc.: 1:10
Unid.: cm

7.2 Anexo 2: Exemplo de determinação do ângulo de atrito interno (ϕ_i) e do efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)

Para exemplificar a metodologia utilizada é apresentada neste anexo a determinação do ângulo de atrito interno (ϕ_i) e do efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e), com a seqüência de carregamento 100N de carga de pré-cisalhamento, 70 N, 50 N e 35 N de cisalhamento, proposto por Haaker (1999).

Primeiramente, é necessária a pesagem da célula de cisalhamento com a amostra. No exemplo, o peso total foi de 328 gramas.

Com a carga de pré-cisalhamento (100 N) foi determinada uma força cisalhante de 7,2 N. Com as cargas de cisalhamento de 70 N, 50 N e 35 N foram determinadas as forças cisalhantes de 6,3; 5,3 e 4,1 N respectivamente (Figura 64).

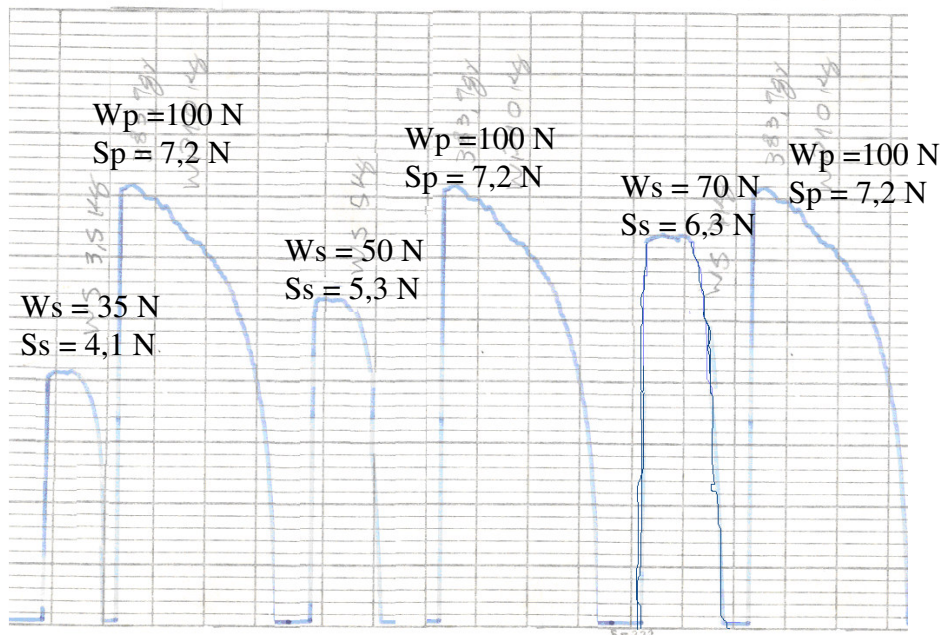


FIGURA 64 - Registro das forças cisalhantes para a determinação do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno

Tendo em vista as cargas determinadas pode-se preencher o programa YIELD LOCUS, conforme a Figuras 65.

```
Entre o nome do produto armazenado:      CAFÉ
Número de yield loci: 1
Número de Twisting: 35
Carga Normal de Twisting: 10

Yield Locus N°. : 1
Carga Normal de pré-shear: 10
Número de pré-shear: 3

Pré-shear N°. : 1
Entre a célula: S
Wt: 0.328      [kg]
Ws: 7          [kg]
Sp: 7.2       [N]
Ss: 6.3       [N]
```

FIGURA 65 - Preenchimento do programa Yield locus para a seqüência de carregamento 100 N de pré-cisalhamento e 70 N de cisalhamento.

Os resultados obtidos estão mostrados no gráfico da Figura 66.

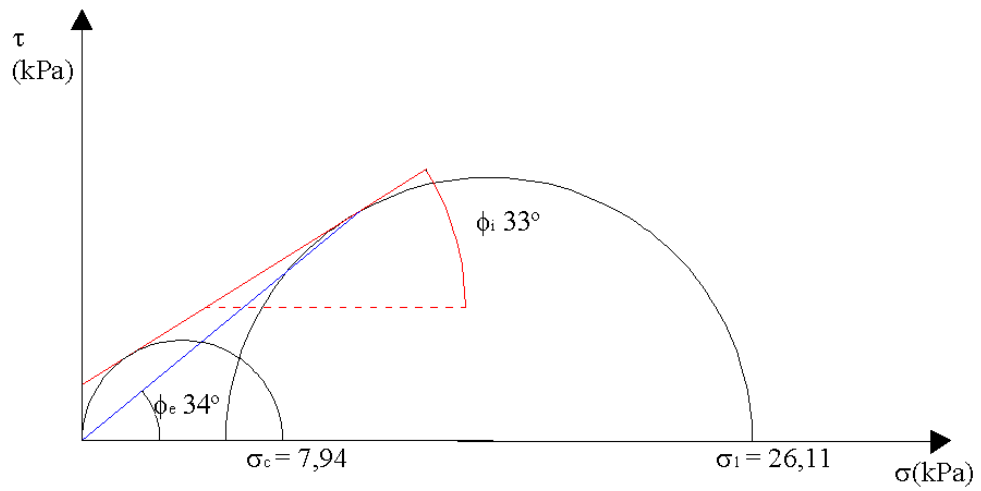


FIGURA 66 - Gráfico tensão normal (σ) por tensão cisalhante (τ) para o exemplo determinado

7.3 Anexo 3: Recomendações para o projeto de silos para o café cereja descascado

Considerando-se as propriedades determinadas, é possível fazer recomendações para projetos de silos e equipamentos para café. A primeira consideração que deve ser feita é em relação à fluxibilidade do produto. Neste sentido, é importante destacar, que embora o produto café cereja descascado seja um produto que flui facilmente, ele apresenta uma tendência a ter problemas de fluxo com o tempo de armazenamento.

A segunda consideração a ser feita é em relação ao fluxo do produto, se é desejado fluxo de massa ou fluxo de funil. Para o produto café, de maneira geral, não há a necessidade de se adotar fluxo de massa, uma vez que durante a descarga não ocorre segregação do produto. Desta forma, a utilização de silos projetados para fluxo de funil proporciona uma estrutura mais baixa e mais barata, uma vez que a inclinação da tremonha pode ser menor, reduzindo assim os momentos fletores nas colunas de sustentação.

Em termos de projeto, é necessário definir o material que será utilizado na construção do silo, antes de se definir a geometria e inclinação da tremonha. A escolha do material é dependente da estrutura que está se projetando, do local onde o silo será instalado e do custo de implantação do projeto. Alguns materiais como aço liso e madeira são utilizados com mais frequência. Podem ser adotados nos projetos os valores dos limites superiores e inferiores para o ângulo de atrito com a parede (ϕ_w), sendo: 14° e 16° para o aço liso e 15° e 18° para a madeira.

Definido o tipo do material que será utilizado na confecção do silo, a próxima etapa será a geometria do silo e da tremonha. Esta característica também é dependente do local onde o silo será instalado e de sua finalidade. Para pequenos e médios produtores, que não fazem distinção entre diferentes

tipos de produtos, é recomendável a utilização de silos cilíndricos, pois a estrutura fica mais leve e economicamente mais viável. Para produtores, cooperativas, torrefações, etc., onde há a necessidade de se fazer a separação de lotes de produtos diferenciados, é recomendável a utilização de silos multicelulares, ou seja, silos divididos em seções (Figura 67). De maneira geral, para melhor aproveitamento da área, estes silos devem apresentar seções retangulares.

Os silos subdivididos em células permitem um melhor controle do produto. Teremos lotes diferenciados pela qualidade e padrão.

A forma geométrica da tremonha, assim com a inclinação de suas paredes, é definida em função do modo de descarga, ou seja, descarga excêntrica ou centrada. A utilização de tremonhas com boca de descarga centrada contribui para uma estrutura econômica. Como dito anteriormente, a inclinação da tremonha não é um fator limitante, uma vez que o produto não necessita de fluxo de massa. Sendo assim, a recomendação a ser feita é no que diz respeito ao acúmulo de material no fundo do silo. Para que isto não ocorra, a tremonha deve ter inclinação maior do que o limite superior do ângulo de repouso, ou seja, deve apresentar inclinação superior a 33° para café cereja descascado com um teor de umidade de 12%, embora deva ser observado o material empregado na confecção da parede e do fundo do silo.

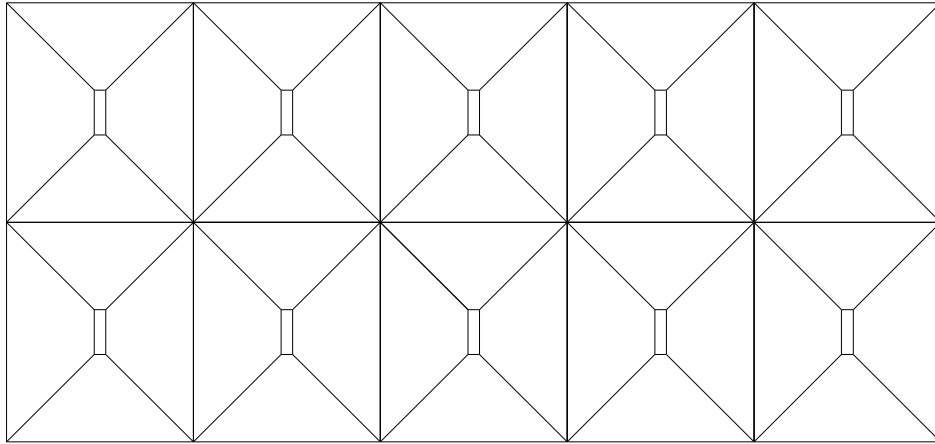


FIGURA 67 - Exemplo de disposição de silos multicelulares.

8 GLOSSÁRIO

Ângulo de atrito interno: Inclinação do lugar geométrico de deslizamento com o eixo das tensões normais.

Efetivo ângulo de atrito interno: Inclinação formada entre a reta que passa pela origem e tangência o maior semi-círculo de Mohr com o eixo das tensões normais.

Ângulo de atrito com a parede: Inclinação da reta que representa o lugar geométrico de deslizamento com a parede com o eixo das tensões normais.

Função fluxo do produto: Relação entre a tensão de consolidação e a tensão inconfínada de ruptura.

Tensão de consolidação: Maior tensão principal do semi-círculo, que representa o estado de fluxo estável.

Tensão inconfínada de ruptura: Maior tensão principal do menor semi-círculo de Mohr.

Fator fluxo da tremonha: Relação entre a tensão de consolidação e a tensão formada em um arco imaginário.

Ângulo de repouso: Ângulo formado pelo talude natural do produto.