



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**



**Determinação das propriedades físicas e de fluxo de produtos
granulares e pulverulentos utilizando a metodologia Jenike**

RAFAEL COSTA SILVA

Campina Grande - Paraíba

Dezembro - 2010

**Determinação das propriedades físicas e de fluxo de produtos
granulares e pulverulentos utilizando a metodologia Jenike**

RAFAEL COSTA SILVA

Monografia submetida à
Coordenação do Curso de
Engenharia Agrícola, da
Universidade Federal de Campina
Grande, como requisito para a
obtenção dos créditos da
disciplina Estágio Supervisionado
do curso de Engenharia Agrícola.

Dezembro - 2010



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA



**Determinação das propriedades físicas e de fluxo de produtos
granulares e pulverulentos utilizando a metodologia Jenike**

Banca Examinadora


Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento


M.Sc. Valneide Rodrigues da Silva


M.Sc. Tiago Gonçalves Pereira Araújo



Biblioteca Setorial do CDSA. Abril de 2021.

Sumé - PB

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que ilumina e guia meus caminhos, me fortalecendo em todos os momentos da minha vida;

Aos meus pais Mozaniel e Olívia, a quem devo tudo o que sou. Toda a dedicação e apoio nos momentos que mais precisei lá estavam eles. São as pessoas que mais admiro nesse mundo.

As minhas irmãs Renale e Raissa, pelos momentos de cumplicidade e descontração;

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento, pelos incentivos e conhecimentos repassados a mim;

Aos amigos pessoais e colegas de curso, por fazer parte de momentos de grande felicidade de minha vida.

A todos, o meu muito Obrigado!

SUMÁRIO

	Pág
1. Introdução.....	7
2. Objetivos.....	9
2.1 Geral.....	9
2.2 Específicos.....	9
3. Fundamentação Teórica.....	10
3.1 Armazenamento de produtos no Brasil.....	10
3.2 Classificação dos silos.....	14
3.3 Constituição de um silo.....	15
4. Projeto de fluxo de produtos sólidos.....	18
4.1 Fluxo de massa.....	18
4.2 Fluxo de funil.....	18
5. Possíveis problemas encontrados no projeto de fluxo.....	18
5.1 Arqueamento.....	19
5.2 Efeito tubo.....	19
5.3 Descarga incompleta.....	19
6. Propriedades físicas e de fluxo.....	20
6.1 Teor de umidade.....	20
6.2 Granulometria.....	20
6.3 Peso Específico consolidado (γ).....	21
6.4 Ângulo de atrito interno (ϕ_i) e Ângulo efetivo de atrito interno (δ).....	21
6.5 Ângulo de atrito interno com a parede.....	22
6.6 Função fluxo.....	22
6.7 Fator fluxo.....	23
7. Material e métodos.....	24
8. Resultados e discussão	28

8.1 Café.....	28
8.2 Aveia.....	31
8.3 Arroz.....	35
8.4 Canola.....	36
8.5 Achocolatado.....	38
8.6 Diversos grãos.....	39
9. Conclusão.....	42
10. Referências bibliográficas.....	43

1. Introdução

Com o aumento da produção agrícola de pulverulentos e granulares no âmbito mundial, faz-se necessário obter informações mais precisas e relevantes a respeito dos mesmos para que haja um melhor manuseio. Esse conhecimento é importante na construção e desenho de equipamentos específicos para determinar as características desses produtos pulverulentos, para que nos leve a viabilizar idéias a respeito de armazenamento para uma maior conservação, manuseio e até mesmo o transporte desses produtos.

Os silos, células ou armazéns a granel são largamente usados na indústria, mineração e agricultura. Eles são, entretanto difíceis de projetar com relação a fluxos contínuos a como estruturas econômicas e seguras, devido aos materiais particulares a serem armazenados terem propriedades diferentes daqueles dos líquidos e dos sólidos. Quando usado na indústria à produção industrial pode parar por interrupção do fluxo em um silo (CALIL JR, 1990).

Atualmente, sua aplicação estende-se tanto às indústrias químicas, farmacêuticas, alimentícias, siderúrgicas, mineração quanto construção civil para armazenagem de produtos sólidos como argilas, cimentos, bentonitas, pozolanas, e agregados devendo-se este ao fato elevado nível industrial alcançados nos últimos anos bem como ao desenvolvimento de novos materiais armazenáveis como fibras e polímeros (LOPES NETO, 2008) e principalmente na agricultura. Dessa forma, os silos passam a não somente desempenhar a função de unidades armazenadoras, mas também devem apresentar desejável versatilidade no que diz respeito aos processos de carregamento, descarregamento e transporte de seu conteúdo (AYUGA, 1995)

A necessidade de aumentar a capacidade de armazenamento e de atender às necessidades das empresas de processamento demonstra a importância do estudo da problemática de silos, para o desenvolvimento de novas tecnologias e soluções dos problemas existentes. Para projetar um silo para um determinado tipo de fluxo deverão ser consideradas conjuntamente as características do produto e as do próprio silo. A determinação das propriedades do material armazenado é fundamental, sendo a etapa inicial para a definição do fluxo no silo, que deve ser realizada nas condições mais severas daquelas que podem ocorrer no silo.

Para que seja determinada as propriedades desses produtos, uma série de fatores irão influenciar de maneira decisiva, tais como: a granulometria (dimensão das partículas), o teor de umidade e densidade. Nos projetos de silos, a determinação das propriedades do produto armazenado é de grande importância para a definição das ações e do fluxo devido às características inerentes de cada produto

O processo de armazenamento de produtos pulverulentos requer cuidados na construção dos silos, tendo em vista que uma grande maioria das falhas que ocorrem nesses projetos surge a partir do desconhecimento das propriedades de fluxo desse produto.

Existem alguns critérios para um projeto de construção de silos que devem ser ressaltados, de acordo com Roberts (1987), tais como: propriedades de fluxo (onde o teste mais utilizado é o ensaio de cisalhamento de Jenike), determinação da resistência, estudo do design do silo, para que promova o fluxo e descarga desejável e pressões exercidas nas paredes do silo.

Sabe-se, ainda, que as propriedades de fluxo dos produtos sólidos são geralmente influenciadas pelas características do ambiente ao entorno do silo como pelo tempo de armazenagem, e que, quando um produto é submetido a esforços de compressão por determinado tempo, o mesmo pode adquirir resistência e desenvolver problemas de fluxo.

2. Objetivos

2.1 Geral

Determinar as propriedades físicas e de fluxo necessárias para produtos pulverulentos e de grãos (café em pó, aveia, arroz, canola, achocolatado), para um projeto de silo vertical. Fazer a análise dessas propriedades, bem como as pressões internas do silo, mediante diferentes condições de descarregamento.

2.2 Específicos

- Mensurar as propriedades físicas e de fluxo dos produtos armazenáveis;
- Reduzir os problemas gerados pela segregação por tamanhos de partículas;
- Fazer um estudo para facilitar a descarga de produtos;
- Analisar a função fluxo (FF) e o fator fluxo (ff), para cada produto estudado.

3. Fundamentação Teórica

3.1 Armazenamento de produtos no Brasil

O Brasil está aumentando a produção de grãos a cada ano e, é óbvio, que a capacidade de armazenagem do país deverá atender a este crescimento de produção e, mais ainda, com a qualidade que o mercado exige. Os equipamentos de armazenagem inseridos na unidade armazenadora de grãos são um dos itens essenciais para a garantia da qualidade demandada para a comercialização destes grãos (LORINI, 2009).

A capacidade de armazenar grandes quantidades de grãos é de fundamental importância para a cadeia logística de escoamento da produção agrícola, por dois principais motivos: possibilita a venda do produto em melhores épocas para sua comercialização (melhores preços e menores custos com transporte) e evita o congestionamento da cadeia em períodos de safra, especialmente os portos (IBGE, 2008). No Brasil, a capacidade estática de armazenagem é inferior à produção de grãos agrícolas, 120 Mt ante uma 160 Mt de grãos produzidas em 2007. Considerando-se a recomendação da FAO para que a capacidade estática de armazenagem de um país seja igual a 1,2 vezes sua produção agrícola anual, o nível indicado para o Brasil é de cerca de 190 Mt de capacidade, o que corresponde a um déficit nacional de capacidade da ordem de 70 Mt (CONAB, 2008).

A situação é ainda mais alarmante por que a produção agrícola vem crescendo em ritmo mais acelerado do que a capacidade de armazenagem. No período entre 1990 e 2007, a primeira cresceu em média 6,16% a.a., enquanto o segundo apresentou crescimento médio de apenas 2,85% a.a (CONAB, 2008).

A análise da infraestrutura brasileira de armazenagem de grãos passa necessariamente pela compreensão da dinâmica do mercado agrícola nacional. O mercado de alguns dos principais produtos agrícolas brasileiros é quase totalmente controlado pelas tradings multinacionais de commodities. Empresas como a Bunge, Cargill e ADM concentram cerca de 60% do mercado da soja, somente a Cargill detém 40% do mercado de milho e 60% do mercado de açúcar também está nas mãos das principais tradings. Tais empresas participam de toda a cadeia produtiva e da comercialização dos grãos agrícolas. Têm suas próprias unidades de armazenagem e

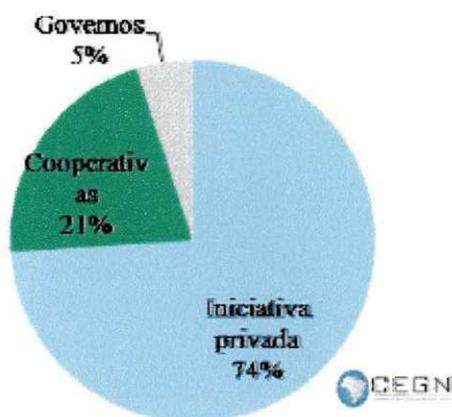
transbordo espalhadas pelas regiões produtoras, geralmente localizadas próximas a rotas de escoamento, de onde os produtos seguem para suas unidades de processamento ou para a exportação (CONAB, 2006).

Silos são estruturas destinadas ao armazenamento de produtos sólidos sendo seu uso largamente empregado em estabelecimentos agrícolas e portos marítimos e fluviais para conservação de cereais (LOPES NETO, 2008).

As grandes tradings atuam também junto aos produtores para garantir produto para suas unidades de processamento e para exportação. A relação com os produtores se dá de duas formas principais: as tradings podem atuar como agentes financiadores da produção, fornecendo crédito para a compra de insumos e o plantio, mas impondo como uma das condições do financiamento a comercialização da produção com a própria empresa; de outra forma, as tradings comumente firmam contratos com os produtores em períodos bem anteriores à colheita, utilizando-se da modalidade de contratos “a fixar”, em que o preço de venda dos grãos é definido de acordo com a cotação na BM&F (Bolsa de Mercadorias e Futuros) no momento da efetivação da compra. Nesse caso, costuma ser fixado um período, de cerca de duas semanas a um mês, para que o produtor defina o momento de realização da transação. Mesmo assim, esses períodos, intitulados de janelas, concentram-se no período de safra dos produtos, quando sua cotação encontra-se em baixa. Tais medidas reduzem os riscos do produtor, mas, da mesma forma, diminuem suas possibilidades de ganho e negociação de preços melhores. Somam-se a isso a aversão ao risco por parte de parcela significativa dos produtores, devido às grandes oscilações nos preços de commodities agrícolas, e a necessidade de capital para o plantio da safra seguinte, que fazem com que muitas vezes os produtores não invistam em capacidade de armazenagem, que poderia lhes proporcionar melhores preços de venda a seus produtos (CONAB 2006).

A partir de 1971, o Governo Federal iniciou uma política de controle da inflação através da criação de estoques públicos de gêneros alimentícios. Tal ação tinha como objetivo minimizar o impacto que a sazonalidade da produção agrícola tinha sobre a economia nacional. Esta medida fez com que a maioria dos grandes armazéns fossem controlados pelo Estado. Contudo, desde a década de 90, após o controle inflacionário, a administração de grande parte da infraestrutura de armazenagem passou à iniciativa privada.

O Governo Federal, através da CONAB, tem monitorado os estoques nacionais de grãos pelo Cadastro Nacional de Unidades Armazenadoras (CNUA). Apesar da obrigatoriedade do cadastro (Lei 9.973/2000 e Decreto 3.855/2001), a CONAB tem, através de mutirões de cadastramentos, realizado esforços para atualizar o CNUA. O histórico de privatizações modificou o perfil proprietário dos armazéns nacionais, fazendo com que o papel da iniciativa privada ganhasse importância. O Gráfico 1 revela o atual panorama do setor.

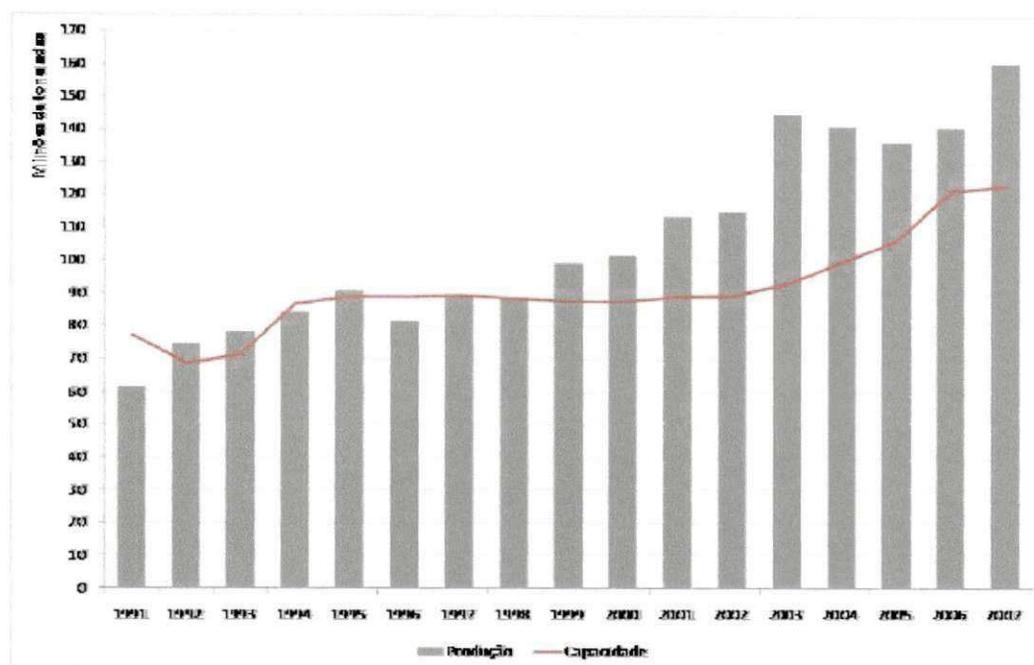


Fonte: CONAB (2007)

Gráfico 1: Propriedade dos armazéns nacionais.

No Brasil, a infraestrutura de armazenamento de grãos é constituída em grande parte por unidades específicas para armazenagem a granel (silos), que respondem por 78% da capacidade total. Os outros 22% são constituídos por armazéns convencionais, que utilizam sacas e fardos para o armazenamento do produto, apresentando desvantagens na conservação e operações de carga e descarga dos grãos em relação ao sistema de silos.

Atualmente, o Brasil detém uma capacidade estática de armazenagem inferior ao volume de sua produção de grãos, o que é agravado pelo fato de que a produção cresce a uma velocidade superior à da capacidade estática. Isso gera a perspectiva de um cenário negativo em um futuro próximo, caso não haja investimentos no setor. No Gráfico 2, pode-se comparar o volume anualmente produzido de grãos e a capacidade estática total do Brasil, desde 1991 até 2007.



Fonte: CONAB 2007

Gráfico 2: Produção de grãos agrícolas vs capacidade de armazenamento no Brasil, desde 1991 até 2007.

Nota-se que, no período analisado, a capacidade de armazenagem tem crescido em ritmo mais lento que a produção agrícola no país, o que resultou no grande déficit atual de capacidade, da ordem de 70 Mt. Entre 1991 e 2007, enquanto a capacidade dos armazéns cresceu em média 2,85% a.a., a produção de grãos agrícolas avançou a uma taxa média de 6,16% a.a.

Além da insuficiência da capacidade estática total, os armazéns são distribuídos de forma desigual no território brasileiro. A capacidade de armazenagem no país concentra-se na Região Centro-Sul, havendo apenas 7,8% do total nas regiões Norte e Nordeste. Tal concentração está relacionada com o histórico da produção agrícola em cada região do país, mas, dessa forma, novas fronteiras agrícolas nos estados mais ao norte do país carecem de infraestrutura adequada para o armazenamento da produção. A região que mais concentra armazenagem é a Região Sul, com 41% do total. Contudo, a sua participação vem diminuindo, em virtude principalmente da expansão mais acentuada da armazenagem na Região Centro-Oeste, que já responde por 35% do total do país. O Nordeste também tem expandido sua capacidade de armazenagem significativamente nos últimos anos, com um crescimento de 25% a.a. desde 2001, apesar da baixa representatividade sobre o total (5,9%) (IBGE, 2007).

3.2 Classificação dos Silos

Os silos possuem sua classificação quanto ao material empregado na sua confecção, à sua construção em relação ao solo, ou quanto ao seu aspecto geométrico (LOPES NETO, 2008).

Em função de seu material construtivo, os silos podem ser confeccionados a partir de vários tipos de materiais, dentre eles: concreto, alvenaria, chapas metálicas, madeira, ou até mesmo materiais alternativos.

Com relação à sua construção em relação ao solo, Calil Junior (2007) classifica em: silos elevados ou aéreos (que são construídos acima do nível do solo), e silos subterrâneos (que se localizam abaixo do nível do solo, sendo construções mais simples, porém mais susceptíveis à infiltração de água e tem um esvaziamento mais difícil).

Já com relação ao seu aspecto geométrico, Calil Junior & Cheung (2007) dividem os silos elevados em esbeltos e baixos em função da relação das dimensões altura e diâmetro.

Tabela 1: Classificação dos silos quanto à sua geometria, de acordo com Calil Junior (2007).

Silos elevados	Silos esbeltos: possuem relação entre altura e o diâmetro $\left(\frac{H}{D}\right) \geq 1,5$
	Silos baixos: possuem relação entre altura e o diâmetro $\left(\frac{H}{D}\right) \leq 1,5$
Silos horizontais São aqueles cuja dimensão longitudinal é preponderante sobre as outras dimensões.	

Os limites para designação de sua classificação quanto à sua geometria, pode variar com relação a cada autor. Um padrão internacional é utilizado, conforme a tabela abaixo.

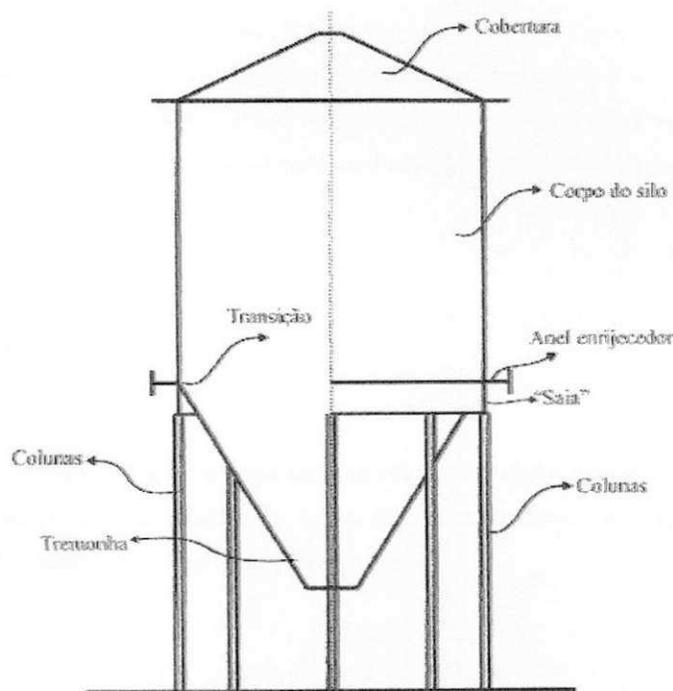
Tabela 2. Classificação geométrica de silos quanto à sua geometria de acordo com as normas internacionais.

Norma	CLASSIFICAÇÃO		
	Baixo	Medianamente esbelto	Esbelto
AS 3774 (1996)	$\left(\frac{H}{D}\right) < 1$	$1 < \left(\frac{H}{D}\right) < 3$	$\left(\frac{H}{D}\right) > 3$
ENV 1991-4 (1995) ISO 11697 (1995)	$\left(\frac{H}{D}\right) < 1,5$	---	$\left(\frac{H}{D}\right) > 1,5$
ACI (1991)	$\left(\frac{H}{D}\right) < 2$	---	$\left(\frac{H}{D}\right) > 2$

--- Não possui classificação.

3.3 Constituição de um silo

As principais partes constituintes dos silos são mostradas na figura abaixo.



Fonte: Neto (2008)

Figura 1: Constituição de um silo vertical

- Cobertura

A sua principal função é promover a segurança do produto armazenado tanto quanto de proteger o silo das intempéries, como a chuva, a neve e as radiações solares, bem como de evitar a entrada de animais por sua parte superior. Deve apresentar uma inclinação suficiente para a drenagem da água.

- Corpo do Silo

É no corpo do silo onde ficará armazenado todo o material. A sua forma é fator que influencia na escolha da forma da cobertura, bem como o plano de fundo (tremonha).

- Anel enrijecedor

Com a função de adicionar resistência às paredes em pontos estratégicos onde, comumente as forças horizontais são maiores (porém também pode ser colocados na parte superior, próximos à cobertura), esses anéis também evitam a ovalização da estrutura do silo, dependendo da carga aplicada.

- Colunas

São elementos que formam a base de sustentação do silo. Sua função é de suportar toda a carga vertical formada pelo peso próprio do silo juntamente com o peso do produto ensilado, bem como são projetadas para suportar a flambagem, tração, compressão e vibrações geradas pelos ventos ou até mesmo pelo fluxo do produto em seu interior. Os silos que possuem tremonha (Figura 2), geralmente, possuem colunas de sustentação. Já os silos de fundo plano apresentam sua estrutura suportada pelo solo (Figura 3).



Fonte:

http://www.bigdutchman.com.br/produtos.php?cod_subgrupo=23

Figura 2: Silos com tremonhas e colunas



Fonte:http://www.engebase-rs.com.br/obras/bases_silos.html

Figura 3: Silo de fundo plano

- Tremonha

Localizado na parte inferior do corpo do silo, sua função é de possibilitar um escoamento uniforme do produto armazenado, para tanto se faz necessário uma análise específica para seu dimensionamento, bem como da sua geometria. Sua principal vantagem é de apresentar um descarregamento gravitacional, enquanto que os silos com fundo plano necessitam de equipamentos especiais para fazê-lo. A desvantagem é que encarece o projeto, por requererem colunas de sustentação.

Existem várias formas geométricas de tremonhas, dentre elas: cônica (Figura 4), quadrada, de transição, piramidal e cunha.



Figura 4: Tremonha cônica

4. Projeto de fluxo de produtos sólidos

Jenike (1964), pioneiro no estudo de comportamento de sólidos sobre condições de armazenagem, definiu dois tipos básicos de fluxo: massa e funil.

4.1 Fluxo de massa

Define-se fluxo de massa aquele onde o produto entra substancialmente em movimento em todas as partes do silo no momento do processo de descarregamento (ocorre quando as paredes da tremonha são suficientemente inclinadas e lisas e não existem abruptas transições).

4.2 Fluxo de funil

Conceitua-se como sendo tipo de fluxo onde apenas parte do produto entra em movimento através de um canal vertical (efeito tubo) formando no interior do silo. O efeito tubo ocorre em virtude de uma íntima associação entre produtos coesivos sendo descarregados em silos, dotados de paredes de tremonhas rugosas e com elevado ângulo de inclinação com a vertical.

Segundo Calil Junior & Cheung (2007), o fluxo pode ser pré-definido com base no coeficiente de atrito do produto com a parede e na inclinação da tremonha, é recomendado que seja sempre diminuído de 3° para se obter um padrão de fluxo seguro, devido às incertezas do processo.

5. Possíveis problemas encontrados no projeto de fluxo

No projeto de fluxo, alguns problemas podem ocorrer, e que o projetista deve ficar atento para evitá-los. São eles: atenção às altas ou baixas pressões exercidas no silo, irregularidade no fluxo, segregação da massa ensilada e possíveis ruídos ou vibrações indesejadas (Rotter, 2001).

Além desses citados anteriormente, ainda segundo Rotter (2001), outros problemas podem vir a causar no interior do silo com a massa ensilada, que são eles: arqueamento, efeito tubo e descarga incompleta.

5.1 Arqueamento

Diz-se do fenômeno quando ocorre, com a massa ensilada, um elemento obstrutor na forma de um arco, logo acima do orifício de descarga, e geralmente ocorre quando o silo é composto por uma tremonha, podendo resultar em uma estagnação do fluxo.

Esse fenômeno ocorre devido a alguns fatores intrínsecos ao produto e ao silo, dentre eles destacam-se: à coesão nos sólidos, às geometrias dos silos e tremonhas, à dimensão do orifício de descarga (Drescher, Waters e Rhoades, 1995), bem como às propriedades físicas e de fluxo, além das condições ambientais e o tempo (Teurnou & Fitzpatrick, 1999).

O arqueamento pode ser bastante perigoso à integridade estrutural do silo, tendo em vista que seu desprendimento tende a gerar um efeito de sucção do ar na parte superior do corpo do silo simultaneamente a um acréscimo abrupto de pressão de elementos logo abaixo de sua localização (LOPES NETO, 2008).

5.2 Efeito tubo

O efeito tubo ocorre geralmente no fluxo de funil, caracterizando-se pela estagnação do material ensilado nas adjacências do canal de fluxo e ao longo de toda a altura do silo. Tão perigoso quanto o processo de arqueamento, o efeito tubo pode ocorrer deformações e rupturas das paredes e no orifício de descarga. Para que seja evitado o efeito tubo, seria recomendada a utilização do fluxo de massa, uma vez que possui uma descarga mais uniforme. Quando não possível, realizar o esvaziamento do silo para que possa ser reparado.

5.3 Descarga incompleta

Ocorre quando parte do material ensilado não é descarregado. Com isso, pode ocasionar a perda da capacidade efetiva de armazenamento e possíveis contaminações do produto.

6. Propriedades físicas e de fluxo

6.1 Teor de Umidade

A quantidade de água do produto é um fator de análise para o fluxo no interior do silo. Segundo Calil Junior (1990), o fluxo de um sólido decresce com o aumento do teor de umidade, alcançando um valor máximo de aproximadamente 80 a 90% de saturação. Pois passando desse valor, o produto adquire propriedades viscosas, e testes de cisalhamento podem não ser eficazes.

Durante os ensaios, a amostra deve estar relativamente úmida e, o operador ter bastante cuidado quando manipula a célula de cisalhamento, para minimizar erros devidos à evaporação. Segundo Calil Junior (1990), pode ser reparada mantendo a sala dos testes em uma alta umidade relativa.

6.2 Granulometria

Essa propriedade é interessante ser analisada, pois o tamanho das partículas do material a ser ensilado influencia em seu escoamento. Tendo em vista que as partículas de materiais pulverulentos são mais propícias a problemas como formação de arcos, enquanto que os materiais granulares possuem o fluxo livre.

Segundo Nascimento (1996), os produtos que não contêm partículas menores que 0,25mm são produtos de fluxo livre. Mesmo assim, existem exceções, como por exemplo, os grãos que fermentam sob diversos teores de umidade e condições atmosféricas adquirem resistência e deixam de ser de fluxo livre. Figura 5.



Figura 5: Peneiras utilizadas para granulometria

Cada autor segue sua classificação. Ravenet (1983), classifica os produtos, com relação ao tamanho de suas partículas, em:

- Partículas grossas: Dimensão > 100mm
- Partículas granulares: 30mm < Dimensão < 5mm
- Partículas finas: 5mm < Dimensão < 100 microns

6.3 Peso Específico consolidado (γ)

Alguns autores afirmam que a densidade do produto não são propriedades de grande relevância ou são desprezíveis para um projeto de silo vertical.

Calil Júnior (1984) afirma que produtos pulverulentos de baixa densidade têm a vantagem de fluir com menor resistência à compactação na tremonha, mas tem a desvantagem da inércia em repouso e uma alta resistência ao ar. Um produto pulverulento de alta densidade pode compactar para uma maior resistência na tremonha, mas terá uma baixa inércia em repouso. O produto granular não é tão compressível, logo não ganha muita resistência em sua boca de descarga do silo.

Ainda segundo Calil Junior (2007), existem basicamente três diferentes valores de densidades, chamadas: soltas, compactas e aeradas.

6.4 Ângulo de atrito interno (ϕ_1) e Ângulo efetivo de atrito interno (δ).

Para uma dada condição de consolidação, o lugar geométrico de deslizamento de produtos granulares de fluxo livre é a reta obtida pelo cisalhamento de uma amostra do produto sob várias cargas normais. Com as tensões principais atuantes em um elemento do produto armazenado para uma dada consolidação é construído o círculo de Mohr. A reta que tangencia todos os círculos é chamada de lugar geométrico de deslizamento do produto (YL), já o ângulo de inclinação é conhecido como ângulo de atrito interno do produto (ϕ_1) (Figura 6).

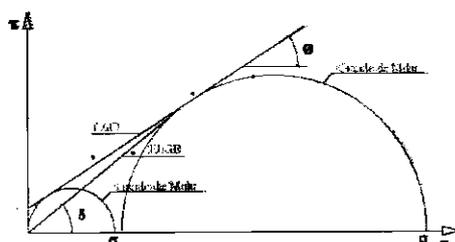


Figura 6: Círculos de Mohr e ângulo de atrito interno.

O ângulo efetivo de atrito interno (δ) será o ângulo formado pela reta que passa pela origem e tangencia o círculo de Mohr definido pela maior e menor tensão principal.

6.5 Ângulo de atrito interno com a parede

Segundo Benink (1989), a força de atrito entre o produto e a parede do silo é percebida no contato que ocorre quando o produto desliza ao longo da parede. A relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal à parede formará uma reta que definirá o lugar geométrico de deslizamento com a parede (WYL). A sua inclinação será o ângulo de atrito do produto com o material da parede do silo.

De acordo com Calil Junior (1990), a determinação deste ângulo é importante tanto para o fluxo como para o cálculo das pressões e deve ser determinado para todas as condições desfavoráveis (umidade, corrosão, abrasão, revestimento da superfície). Em algumas situações, dependendo do carregamento aplicado ao produto, o ângulo de atrito do produto com a parede aumenta. Daí se faz necessário à determinação do mesmo em função do tempo, para se ter valores confiáveis.

6.6 Função Fluxo (FF)

Função Fluxo é definida como a relação entre a resistência e pressões de consolidação (Calil Júnior, 1989), sendo assim uma medida de escoabilidade do produto, de fundamental importância no projeto de silo, principalmente na descarga do produto (Figura 7).

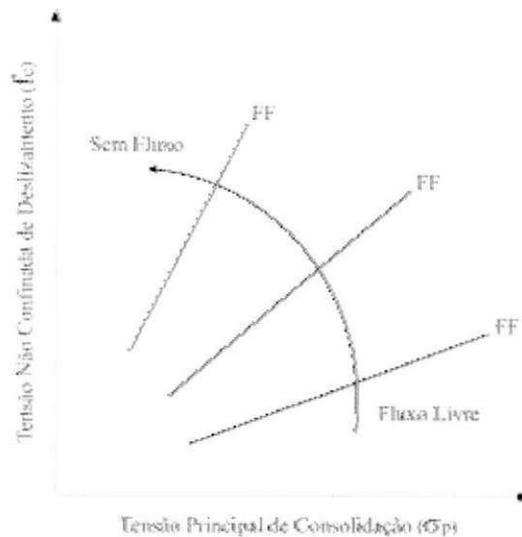


Figura 7: Função fluxo dos produtos.

Quanto menor for a inclinação da reta com relação ao eixo das tensões principais de consolidação, o fluxo será melhor.

Jenike (1964), classifica os produtos de acordo com sua função limite de fluxo (FF), como segue:

Tabela 3: Classificação de acordo com a função limite de fluxo, segundo Jenike.

Classificação	Índice de escoabilidade do produto
Sem fluxo	$FFc < 1$
Muito coesivo	$1 < FFc < 2$
Coesivo	$2 < FFc < 4$
Fluxo Fácil	$4 < FFc < 10$
Fluxo livre	$FFc > 10$

6.7 Fator Fluxo

O Fator fluxo é uma função da forma da tremonha e das propriedades do produto armazenado e indica a escoabilidade do produto, assim, quanto menor esse valor, melhor será a tremonha (Calil Junior, 1990), tornando assim uma propriedade importante na predição e construção de um silo.

Existe uma relação muito importante entre a função fluxo e o fator fluxo. A intersecção da reta que define o ff , com a FF definirá a tensão crítica mínima na tremonha. Esta tensão garantirá que o orifício de descarga terá um valor mínimo que não permitirá a formação de arco.

7. Material e Métodos

Durante todo o período do estágio supervisionado, vários produtos foram testados e analisados. Os principais produtos analisados foram: Aveia (farinha de aveia e aveia em flocos finos), café (café em pó, torrado e in natura), leite em pó, milho (comum, branco e pipoca), arroz (fragmentado, integral e parboilizado), canola, chocolate (achocolatado) e grãos (aveia, azevém, ervilhaca, nabo forrageiro e trigo). Cada um dos produtos, geralmente, com três marcas diferentes para análise.

O experimento foi realizado, no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente – LaCRA, da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, utilizando-se da “Máquina de Jenike” TSG 70-140 (Figura 8), especializada para fazer o processo de cisalhamento por translação. A metodologia adotada para determinar as propriedades de fluxo da farinha e flocos de aveia comercial foi a de MILANI (1993).



Figura 8: Aparelho de cisalhamento “Jenike shear cell”

Para determinação do teor de umidade do produto foi utilizado o método oficial da estufa a 105° C, durante 24 horas, havendo 3 repetições. Com valores dos pesos úmidos e dos pesos secos das amostras, calculam-se os teores de umidade.

A granulometria do produto foi realizada através do método do peneiramento, nos mostra a dimensão das partículas. As amostras foram previamente pesadas, com 200g cada amostra, e depois colocada num sistema de peneiras vibratórias (ABNT) durante 5 minutos. Ao término do procedimento, pesou-se a quantidade de produto retido em cada peneira, determinando-se assim, a percentagem retida em cada peneira. Em seguida o produto foi classificado em função do diâmetro da partícula conforme Jennike e Johanson (1979).

Inicialmente, o anel de cisalhamento é colocado em cima da base na posição off-set, através de uma pressão suave do anel com os dedos contra o parafuso fixo. O anel molde é colocado sobre o anel de cisalhamento, a célula teste é cheia com o produto e o excesso é raspado e nivelado com o topo do anel molde. A tampa de operação de rotações é colocada sobre a superfície do produto e uma força vertical (FV) é aplicada por meio de um pendural de pesos com peso total W_c , desta maneira, compactando o produto. Depois são removidos, o pendural com as cargas, a tampa de operação de rotações e o anel molde e o produto é novamente raspado e nivelado com o topo do anel de cisalhamento. A força horizontal é aplicada ao suporte, por uma haste de medida, acionada mecanicamente, a qual transmite a força em uma velocidade constante de 01 a 03 mm/minuto. A haste é fixada a um sistema de forças e, através de um transdutor, mede a força do cisalhamento FS. Durante a operação de cisalhamento, o anel de cisalhamento move-se da posição off-set original, para a posição off-set final. Nesta direção, o anel de cisalhamento pode percorrer até o fim, uma distância máxima correspondente à soma da espessura das paredes da base e do anel de cisalhamento (Milani, 1993).

A força e respectiva tensão de cisalhamento registrada são inspecionadas e, dependendo do grau de consolidação produzido no produto pela aplicação de cargas de peso W_p , podem ser obtidos três tipos de curvas de tensão de cisalhamento.

Durante o cisalhamento, dentro da célula, na amostra de um particular produto, desenvolve-se uma zona de cisalhamento. Visto que, a haste avança em velocidade constante, o registrador da força de cisalhamento versus tempo transforma essa força em

tensão de cisalhamento. Portanto, é especialmente importante que a força de cisalhamento da haste de medida atue sobre o suporte no plano de cisalhamento (plano entre a base e o anel), nem acima ou abaixo deste plano.

Desta maneira, pode ser visto que para um dado valor de W_p , o valor da força de cisalhamento versus força resistente, depende da densidade original do produto na célula, que depende do grau de consolidação do produto durante a preparação da amostra para o teste de cisalhamento.

Contudo, o teste de cisalhamento constitui-se de duas partes. A primeira é a preparação da amostra para obtenção da consolidação crítica e, obtendo um fluxo de estado estável na célula de cisalhamento com uma densidade do produto definida em zona de cisalhamento. Esta densidade é definida pelos valores das tensões normais e de cisalhamento e pelo fluxo de estado estável. Na segunda parte do teste, a medição real das tensões de cisalhamento é realizada com valores de cargas normais W_s , determinando às forças de cisalhamento necessárias para deslizamento do produto.

A célula de cisalhamento de Jenike é limitada a uma distância de cisalhamento de aproximadamente 6mm. Portanto, o fluxo de estado estável deverá ser alcançado dentro de uma distância de cisalhamento em torno de 4 -5 mm, deixando sobrar uma distância para o teste real de cisalhamento. A técnica para obter um fluxo de estado estável em curta distância de cisalhamento desenvolvida por Jenike, chamado de consolidação, consiste de operações de rotações e de Pré-cisalhamento.

Quando a amostra se encontrar subconsolidada, uma carga maior (W_c) ou um número maior de rotações devem ser aplicados na tampa. Se a amostra é sobreconsolidada, a carga (W_c) ou o número de rotações deverá ser reduzido. Deste modo, é possível por tentativas encontrar uma combinação entre a carga (W_c) e o número de rotações, tal que a seleção de pesos W_t e a força de cisalhamento (tensão de cisalhamento) registrada indiquem a presença da consolidação crítica da amostra. Esta operação é chamada de otimização.

Tendo alcançado esta estabilidade, a haste de medida de força é retraída e, portanto a força de cisalhamento cai a zero. Na segunda parte, a carga W_p é trocada por uma carga menor W_s , o motor é acionado novamente e a força é medida na haste na direção já desenvolvida. Quando a haste toca no suporte, a força de cisalhamento

aumenta rapidamente, indo direto a um valor máximo, representando a força de cisalhamento de deslizamento e depois ela começa a diminuir. Esta parte do teste é chamada de cisalhamento.

A haste de medida de força mede a força de cisalhamento no plano de cisalhamento entre a base e o anel e conseqüentemente, a correspondente força normal neste plano será determinada. Na célula de cisalhamento de Jenike esta força normal (F_v) é uma força vertical produzida pela combinação dos pesos: carga W_s ; pendural de pesos H ; tampa de cisalhamento W_L ; anel W_r e material dentro do anel de cisalhamento sobre o plano de cisalhamento (W_m).

Tensões de pré-cisalhamento são designadas por σ_p e τ_p (ponto de pré-cisalhamento, P) e as tensões de deslizamento por σ_s e τ_s (ponto de cisalhamento, S).

Quando se planeja o teste de cisalhamento, é necessário selecionar os níveis de cargas de pré-cisalhamento e de cargas normais de cisalhamento, aos quais os testes serão realizados. Estes são referidos como níveis de tensões, normais de pré-cisalhamento e normais de cisalhamento

Para a determinação das propriedades de fluxo utilizou-se a maquina de Jennike (Jennike Shear Cell) para realizar os ensaios de cisalhamento instantâneo e o de atrito do produto e a parede. Foi utilizado o anel de 93mm de diâmetro e com 15 à 25 rotações).

A tabela abaixo mostra os níveis de carga que foram utilizados nos testes de cisalhamento e pré-cisalhamento para todos os produtos.

Tabela 4: Níveis de carga utilizados nos ensaios.

Pré-cisalhamento (kg)	Cisalhamento (Kg)	Número de repetições
7,0	5,0 3,5 2,0	3
5,0	3,5 2,0 1,0	3
3,5	2,0 1,0 0,7	3

Com o auxílio do software AutoCad 2007 determinou-se o ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno, além dos gráficos e círculos de Morh.

Os materiais de paredes utilizados nos ensaios foram aqueles com maior possibilidade de uso nas construções de silos, tanto em níveis de fazenda como industriais, sendo eles alumínio, aço liso e acrílico. Todos os ângulos de atrito foram apresentados com seus limites superior e inferior para que os projetistas possam utilizar o método dos estados limites para o cálculo das pressões atuantes no corpo e na tremonha do silo. Para a obtenção do ffc (Índice de escoabilidade do produto), utilizou-se o valor médio das razões e classificou-se cada produto ensaiado de acordo com a classificação de Jenike.

8. Resultados e Discussão

8.1 CAFÉ

Assim como os demais produtos pulverulentos que foram analisados, foi feita análise de 3 diferentes fabricantes de café, para que seja possível comparar os dados finais e discutirmos possibilidades e viabilidades de construções de silos.

Primeiramente temos a análise do teor de umidade dos produtos

Tabela 5: Teores de umidade do café

Café em pó beneficiado	Teor de umidade (%)
Fabricante 1	4,2
Fabricante 2	4,7
Fabricante 3	5,0

Logo em seguida, foi feita uma análise da dimensão das partículas do café, também com o sistema de peneiras vibratórias (ABNT) e obteve-se os seguintes resultados:

Tabela 6: Análise granulométrica do café

Classificação		Percentual do produto retido no peneiramento		
ABNT	Peneira (mm)	Café fabricante 1	Café fabricante 2	Café fabricante 3
30	0,59	75,6	20,0	78,2
50	0,297	22,4	53,0	14,0
100	0,149	2,0	27,0	7,8

Com base nos dados obtidos classificou-se o café como um produto pulverulento com característica coesiva, de acordo com a classificação de produtos armazenáveis em função do diâmetro das partículas, proposta por Calil Júnior (1984) e Jenile & Johnson (1979).

Além da densidade, com relação às propriedades de fluxo, analisamos o ângulo de atrito interno e o efetivo ângulo de atrito interno, tais com limites inferiores e superiores, e notamos uma variação considerável entre esses limites.

Tabela 7: Ângulos de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno

Produto	Ângulo de atrito interno (°)		Efetivo ângulo de atrito interno (°)		Densidade (Nm ³)
	inferior	superior	inferior	superior	
Fabricante 1	39,49	46,63	43,31	47,96	0,4904
Fabricante 2	33,13	42,68	41,84	46,16	0,4062
Fabricante 3	41,29	46,14	44,51	48,10	0,4099

Agora, para um dimensionamento do silo, é de fundamental importância o conhecimento do tipo de parede que será construído o silo, visando sempre a sua melhor eficiência e viabilidade no projeto. Os principais tipos são: alumínio, aço liso, aço rugoso e acrílico. Logo, fizemos uma análise com esses principais tipos de parede para ver o comportamento do café em cada uma dessas paredes. Veja na tabela abaixo.

Tabela 8: Ângulo de atrito do café com a parede

Produto	Aço liso		Alumínio		Acrílico	
	inferior	superior	inferior	superior	inferior	superior
Fabricante 1	17,05	18,39	12,82	13,78	17,24	17,94
Fabricante 2	13,0	25,6	7,1	22,6	12,4	30,8
Fabricante 3	11,1	23,3	6,4	20,9	11,4	28,1

Já o cálculo do Fator Fluxo: para o café do tipo 1, o fator fluxo (ff) encontrado foi de 1,26 para a parede de acrílico, 1,32 para parede de alumínio e 1,34 para parede de aço liso. O fator fluxo depende da inclinação da tremonha, do efetivo ângulo de atrito interno e do material que foi confeccionado o silo. Quando o fator fluxo não intercepta a

função fluxo, a literatura sugere dimensioná-lo através de outros parâmetros, tais como as dimensões das partículas.

Veja abaixo, para o café tipo 1, o fator fluxo e a inclinação da tremonha para diferentes tipos de paredes.

Tabela 9: Fator fluxo e inclinação da tremonha

Material da parede	Fator fluxo (ff)	Inclinação da tremonha (°)
Alumínio	1,32	61,54
Aço liso	1,34	57,23
Acrílico	1,26	73,23

Tabela 10: ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno

	Ângulo de atrito interno (ϕ_i)		Efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_{ei})		γ	w
	ϕ_i	ϕ_s	ϕ_{ei}	ϕ_{es}		
Grãos	i	s	i	s	Densidade (Nm^{-3})	Teor de umidade
Inatura	30,6	31,7	33,7	33,2	0,59	12
Torrado	40,7	43,8	36,4	41,2	0,26	8

Tabela 11: Ângulo de atrito dos grãos de café inatura e torrado com diversos materiais de parede.

Grãos	Acrílico (°)		Alumínio (°)		Aço Liso (°)		Aço Rugoso (°)	
	i	S	i	s	i	s	i	s
Inatura	11,1	16,6	10,1	13,4	11,1	14,4	17,3	21,6
Torrado	8,7	12,4	9,9	13,3	11,1	15,8	20,6	22,9

Observações

O café apresentou característica de um produto pulverulento coesivo.

Na granulometria observou-se que ocorreu maior percentual retido na peneira de abertura 0,59 mm, ou seja 78,2%, para o café 3;

Também observamos que o valor mais elevado para a inclinação da tremonha do café do tipo 1 foi de 73,23° (parede de acrílico).

Verificou-se que para o grão de café inatura a densidade encontrada foi de 0,59 N m⁻³ e para o café torrado foi de 0,25 N m⁻³, respectivamente.

Dos ângulos de atrito interno que foram 30,6 e 31,7° (grãos inatura), 40,7 e 43,8° (grãos torrados).

8.2 AVEIA

Para a obtenção do peso específico consolidado (γ), foi usado um anel de cisalhamento de 93 mm de diâmetro sendo aplicadas 20 rotações com o uso de 3 níveis de carga.

Tabela 12: cargas de pré-cisalhamento e cisalhamento.

Carga de pré-cisalhamento (Kg)	Carga de cisalhamento (Kg)
5 / 3,5 / 2	7
3,5 / 2 / 1	5
2 / 1 / 0,7	3,5

Para determinar a granulometria da aveia, utilizaram-se amostras de 200 g do produto pelo método de peneiramento, em jogo de peneiras ABNT durante 5 minutos em conjunto de peneiras vibratórias. Ao final do peneiramento, pesou-se a quantidade de aveia retida em cada peneira determinando assim, a percentagem final retida.

Em relação ao teor de umidade da aveia (w) foi efetuado um teste com 3 repetições, utilizou-se 10 g da aveia para cada repetição. As mostras foram pesadas em precisão de 0,001 g com objetivo de obter o peso úmido (P_u) do produto e em seguida foi colada em estufa com circulação forçada de ar, submetida a temperatura de 105 ± 5 °C por 24h, para serem resfriadas em dissegador, na seqüência, pesadas novamente visando obter o peso seco.

Os testes de cisalhamento foram realizados em duas etapas, pré-cisalhamento e cisalhamento. Através da plotagem dos dados nos gráficos e a criação de círculos de tensão de Mohr obteve-se o ângulo de atrito interno (ϕ_i), o ângulo efetivo de atrito

interno (ϕ_e), tensão principal de consolidação (σ_1), a tensão incofinada de deslizamento (σ_c) para cada nível de carga ensaiado, conforme figura 9.

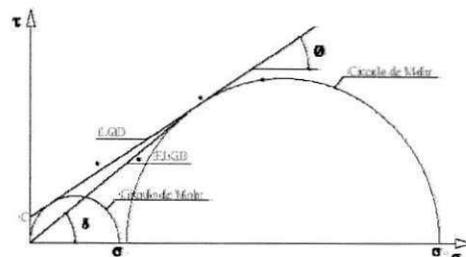


Figura 9: círculos de tensões consolidada (σ_1) e incofinada (σ_c), ângulos de atrito interno (ϕ_i) e ângulo efetivo de atrito interno (ϕ_e) de produtos sólidos.

O método para fazer o cisalhamento baseou-se na aplicação de cargas de 7, 5 e 3,5 kg. O teste começou com a carga máxima de 7 kg para atingir um valor constante. O procedimento se repetiu para as outras cargas 5 e 3,5 kg. Ao término de cada teste a amostra do produto foi pesada e, novamente foi preparada para o ensaio seguinte ou nas repetições adotadas para cada um.

A função fluxo (FF) refere-se à capacidade de um produto fluir, dependendo não só da pressão de consolidação como de outros fatores, entre eles o tempo de armazenamento, teor de umidade e temperatura. A determinação da função fluxo é feita plotando-se os pontos da tensão máxima de consolidação versus resistência incofinada de deslizamento, tensões determinadas através dos lugares geométricos instantâneo de deslizamento.

Tabela 13: propriedades de fluxo da farinha e de flocos finos de aveia

FARINHA DE AVEIA				
	ângulo de atrito interno (°)	efetivo ângulo de atrito interno (°)	tensão de consolidação (KPa)	tensão incofinada (KPa)
Família				
7	23,85°	38,43°	16092,1589	7240,6023
5	19,54°	36,07°	12740,2766	6126,2357
3,5	28,99°	40,49°	8465,8137	3280,0170
FLOCOS FINOS DE AVEIA				
	ângulo de atrito interno (°)	efetivo ângulo de atrito interno (°)	tensão de consolidação (KPa)	tensão incofinada (KPa)
Família				
7	22,73°	32,53°	14751,3633	4732,1772
5	24,37°	32,51°	11064,2429	3058,5274
3,5	27,34°	35,04°	7929,9164	2141,8035

Dados obtidos no gráfico de Mohr para a farinha e os flocos finos de aveia

Tabela 14: fator fluxo, inclinação e ângulo da tremonha para aveia

FARINHA DE AVEIA			
MATERIAL	Ff	Inclinação	θ_m (°)
Alumínio	1,49	33,89	59,80
Aço liso	1,48	34,00	60,90
Acrílico	1,44	34,73	67,68
FLOCOS FINOS DE AVEIA			
MATERIAL	ff	Inclinação	θ_m (°)
Alumínio	1,75	29,67	49,97
Aço liso	1,74	29,81	51,30
Acrílico	1,70	30,43	57,39

Tabela 15: Teor de umidade, densidade e granulometria da farinha de aveia e dos flocos finos de aveia.

Produto	Teor de Umidade	Densidade		Granulometria
AVEIA	(%)	(kN/m ³)		mm
Farinha	11,08	0,59989	0,67302	0,59
Flocos	10,13	0,481635	0,512262	1,00

Observações

Através do experimento realizado com a farinha de aveia e os flocos finos de aveia, pode-se verificar o comportamento físico dos produtos e sua relação com as paredes (alumínio, aço liso e acrílico). Esses dados são primordiais para o dimensionamento correto e a escolha do material da parede adequado para a confecção do silo.

Pode-se verificar que existe uma variação de granulometria entre os produtos, entorno de 40% em relação à maior partícula (1 mm para farinha de aveia e 1,4 mm para flocos finos) já os valores de umidade se mantiveram próximas.

Tendo em vista que para a determinação do sigma crítico não ocorreu na farinha de aveia, verifica-se a necessidade de redução da família de 7 para 5, como forma de verificar a possibilidade de interseção entre a reta do fator fluxo (ff) e a curva da função fluxo (FF).

Com relação ao ângulo da tremonha com a horizontal, a parede de alumínio sempre manteve seus valores abaixo a dos outros materiais, o que caracteriza uma redução no custo de confecção do silo.

Já para as pressões podemos concluir o que o alumínio se apresentou como material mais adequado para a confecção do silo tanto para a farinha de aveia quanto para os flocos finos, porém deve ser dada maior atenção a tremonha, (possível colocação de reforços) tendo em vista que a pressão do produto nesse local foi superior as dos outros materiais.

8.3 ARROZ

A determinação dos teores de umidades foi realizada pelo método da estufa, onde se colocou uma amostra previamente pesada de cada produto em estufa a temperatura de 105 ± 2 °C e, após por 24 h, a amostra foi retirada e novamente pesada e o resultado dado base úmida. As “famílias” de cargas utilizadas foram: 7; 5; 3,5 kg.

Observações

Os resultados médios obtidos para densidade de teores de umidade dos grãos estudados encontram-se na tabela abaixo, observa-se que com o aumento do teor de umidade ocorre um aumento na densidade consolidada dos materiais estudados.

Na Tabela 16 estão os ângulos de atrito dos grãos de arroz obtidos com os materiais de paredes estudados. Ocorreu um aumento nos ângulos entre os grãos avaliados, tanto para o inferior como para o superior, para o arroz integral e parbolizado, mas entre o fragmentado de arroz e arroz integral não houve diferença significativa. Estes resultados serão de grande utilidade para o dimensionamento de equipamentos de transporte, como também para o cálculo das ações nas paredes e fundo do silo, por que consta dos principais tipos de materiais possíveis e viáveis para se empregar na construção de silos. Todas as propriedades de fluxo foram apresentadas com limite superior e inferior, para que os projetistas possam utilizar o método dos estados limites para calcular as pressões atuantes no corpo e na tremonha do silo.

Recomenda-se, para melhor esclarecimento do uso dos limites destas propriedades, a norma australiana AS3774(1996) e o trabalho de CALIL JR. et al. (1997). De acordo com Mohsenin (1986), as propriedades físicas dos produtos agrícolas variam de acordo com a mudança do seu teor de umidade, e isto pode ser verificado na Tabela 17 para os ângulos obtidos nos ensaios com os vários materiais, pois se observa com os resultados obtidos e apresentados, que existe uma tendência de acréscimo dos valores dos ângulos de atrito com o aumento do teor de umidade.

Tabela 16 – Densidades e teores de umidades dos grãos do arroz ensaiados.

Grãos	Densidade (Nm^{-3})	Teor de umidade (%)
Fragmentado de arroz	0,89	12,5
Arroz integral	0,84	12,3
Arroz parboilizado	0,80	12,0

TABELA 17 – Ângulo de atrito dos grãos de estudados com diversos materiais de parede.

Grãos	Acrílico (θ_w°)		Alumínio (θ_w°)		Aço Liso (θ_w°)		Aço Rugoso (θ_w°)	
	i	s	i	s	i	s	i	s
Fragmentado de arroz	11,5	15,2	10,3	12,8	8,8	13,6	9,5	12,8
Arroz integral	11,5	15,4	10,3	12,9	8,8	13,7	9,5	12,9
Arroz parboilizado	13,4	16,9	9,0	17,5	10,4	17,1	22,1	26,1

i – inferior s - superior

Observações

O arroz é um produto granular sem característica coesiva; a densidade variou de 0,80 á 0,89 dos grãos de arroz estudados. O aço liso e rugoso foi o que apresentou menores ângulos de atrito para o fragmentado de arroz e arroz integral, o maior ângulo foi o aço rugoso para o arroz parboilizado.

8.4 CANOLA

O trabalho teve como objetivo determinar as propriedades físicas e de fluxo da canola que serão utilizadas como parâmetros para elaboração de projeto de fluxo em silo, dimensionamento de equipamentos de transporte e processamento. As propriedades determinadas foram: teor de umidade, densidade consolidada (γ); ângulo de atrito interno (ϕ_i), efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) e ângulo de atrito entre a canola e quatro materiais de parede (ϕ_w): acrílico, alumínio, aço liso, aço rugoso.

Na Tabela 18 estão os resultados médios obtidos para densidade e teor de umidade dos grãos estudados, como também os valores médios para o ângulo de atrito interno e o efetivo ângulo de atrito interno. Na Tabela 19 estão os ângulos de atrito dos

TABELA 23 – Ângulo de atrito dos grãos de estudados com diversos materiais de parede.

Grãos	Acrílico (°)		Alumínio (°)		Aço Liso (°)		Aço Rugoso (°)	
	i	s	i	s	i	s	i	s
Aveia Branca	12,4	14,9	10,3	12,3	7,9	13,7	18,9	25,0
Aveia Preta	13,9	14,7	12,9	15,5	8,6	22,1	13,7	17,6
Azevém	13,7	15,4	10,9	12,2	10,1	27,3	22,2	24,9
Ervilhaca	15,8	17,7	11,9	14,8	9,4	13,9	21,5	23,3
Nabo forrageiro	12,8	19,1	11,0	15,9	8,5	13,2	22,2	26,0
Trigo	12,0	19,5	10,0	16,3	7,7	11,3	21,2	26,9

i – inferior s - superior

Observações: Os grãos utilizados para alimentação animal e um produto granular sem com característica coesiva. Para os materiais de parede estudados, os maiores valores encontrados foram para o aço rugoso.

9. Conclusão

Com o estudo, constata-se a importância da determinação das propriedades físicas e de fluxo dos materiais a serem ensilados. Em um projeto de silo, é fator primordial a análise dessas propriedades, para que não ocorra nenhum dos problemas citados anteriormente na pesquisa, a fim de que o projetista tenha parâmetros para dimensionar o silo com precisão, além de manter a estrutura e de prolongar a vida útil do silo. O sucesso de um silo está intrinsecamente ligado à análise dessas propriedades do produto armazenado, afinal, quanto mais precisas forem as informações do produto, o projetista terá mais embasamento para construção do silo.

10. Referências Bibliográficas

ACI-313 (1991) - AMERICAN CONCRETO INSTITUTE Commentary on Recommended practice for design and construction of concrete bins, silos and bukers for storing granular materials.

AS3774 (1996) - AUSTRALIAN STANDARD Loads on bulks solids containers.

AYUGA, F. Los empujes del material almacenado en silos. Informes de la construcción. Madrid, v.46, n.436, p. 27-33, março/abril. 1995.

BENINK, E.J. Flow and stress analysis of cohesioless bulk materiales in silos related to codes. 1989. 162p. Tese Doutorado - Enschede, the Netherlands, Universiteit Tweste, 1989.

CALIL JUNIOR, C. Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1990. 200p. (Apostila).

CALIL JÚNIOR, C. Sobresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de produtos pulverulentos cohesivos. 1984. 184p. Tese Doutorado. Universidad Politécnica de Barcelona, Barcelona, 1984.

CALIL JÚNIOR, C. Recomendação de fluxo e de carga para o projeto de silos verticais. 1989. 100p. Tese de Livre Docência. EESC - USP. 1989.

CALIL JÚNIOR, C. & CHEUNG, A.B. Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo. São Carlos, EESC. p. 232. 2007.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Capacidade estática dos armazéns cadastros por UF. Disponível em: www.conab.gov.br/conabweb/index.php?PAG=155

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Situação da armazenagem no Brasil (2006).

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. SIDRA – Sistema IBGE de Recuperação Automática.

INTERNATIONAL STANDART. ISSO 11697. Bases for desing of structures: loads due to bulk materials. Switzerland. 1995.

JENIKE, A.W., Storage and flow of silos. Salt Lake City. University of Utah. Bulletin 123. Engineering Experiment Station. 1964.

JENIKE, A.W., JOHANSON, J.R. and CARSON, J.W. "Bin Loads – Part 2: Concepts", Journal of Engng. For Industry, Trans. ASME, Series B, 95(1) 1973.

LOPES NETO, J.P. Análise experimental das forças de atrito nas paredes e verticais no fundo de silos cilíndricos. p. 11-38.

MILANI, A.P. Determinação das propriedades de produtos armazenados para projeto de pressões e fluxo em silos. 1993. 272p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estrutura) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

NASCIMENTO, J.W.B. Estudos dos silos metálicos prismáticos para fábrica de ração. 1996. 152p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estrutura) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

RAVENET, J. Silos, flujo e vaciado sólidos, formacion de bovedas, efectos. Barcelona, Espanha: Técnicos Asociados, S.A., 1983. 335p.

RAVENET, J. Silos. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 508 p., 1992.

ROBERTS, A.W. Storag, flow and handling of bulk solids. Newcastle Department of Mechanical Engineering. 1987. p.612.

ROTTER, J.M. Guide for the economic desing of circular metal silos. London: Spon Press, p. 28. 2001.

TEUNOU, E. & FITZPATRICK, J. J. Effect of time and consolidation on food powder flowability. Journal of Food Engeineering, Elsevier Science, n.43, p.97-101, 2001.

WALTERS, J.K., "A theoretical analysis of stresses in axially-symmetric hoppers and bunkers", Chem. Engng. Sci., 28, 779, 1973.