



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

ANÁLISE DE FLUXO E VAZÃO DE MATERIAIS PULVERULENTOS E  
GRANULARES EM SILO VERTICAL

ELIZÂNGELA DE LIMA MOTA

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA  
AGOSTO 2017



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

ANÁLISE DE FLUXO E VAZÃO DE MATERIAIS PULVERULENTOS E  
GRANULARES EM SILO VERTICAL

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Campina Grande como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de Concentração: Construções Rurais e Ambiente  
Orientador: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento

CAMPINA GRANDE – PB  
AGOSTO 2017

M917a Mota, Elizângela de Lima.  
Análise de fluxo e vazão de materiais pulverulentos e granulares em silo vertical / Elizângela de Lima Mota. – Campina Grande, 2021.  
75 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2017.  
"Orientação: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento".  
Referências.

1. Silos. 2. Açúcar. 3. Fluxo. I. Nascimento, José Wallace Barbosa do. II. Título.

CDU 631.24(043)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA MARIA ANTONIA DE SOUSA CRB 15/398



ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA AGRÍCOLA, REALIZADA EM 30 DE AGOSTO DE 2017 (Nº597).

CANDIDATO(A): ELIZANGELA DE LIMA MOTA

COMISSÃO EXAMINADORA: José Wallace Barbosa do Nascimento - Orientador - UAEM/CTRN/UFPG, José Pinheiro Lopes Neto - Examinador - UAEM/CTRN/UFPG e Marcilene Vieira da Nóbrega - Examinadora - UFERSA/ANGICOS. (Portaria COPEAG-MS 21 2017).

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ANÁLISE DE FLUXO E QUALIDADE DE PRODUTOS PULVERULENTOS E GRANULADOS EM SILO VERTICAL

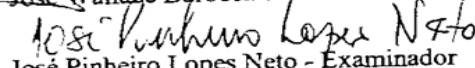
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Construções Rurais e Ambiente

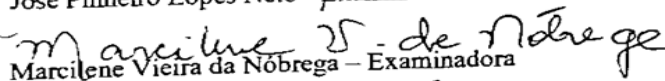
LOCAL: Auditório do BLOCO CK-1, do CTRN/UFPG, campus de Campina Grande.

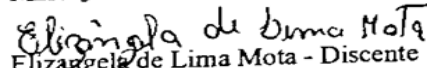
HORÁRIO: 9h

Em sessão pública, após exposição de cerca de 50 minutos, o(a) candidato(a) foi arguido(a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, sendo APROVADO, com modificações no texto, de acordo com as exigências da Comissão Examinadora, que deverão ser cumpridas no prazo máximo de 30 (trinta) dias. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada pelo aluno(a) e demais membros da Comissão Examinadora presentes. Campina Grande/PB, 30 de agosto de 2017.

  
José Wallace Barbosa do Nascimento - Orientador

  
José Pinheiro Lopes Neto - Examinador

  
Marcilene Vieira da Nóbrega - Examinadora

  
Elizângela de Lima Mota - Discente

AGOSTO - 2017

Dedico este trabalho a minha família em especial ao meu esposo Augusto Mota, ao meu pai Gilson Pereira da Silva a minha mãe Elisabete de Lima Silva por sempre me apoiarem e acreditarem em mim, por estarem ao meu lado nos momentos difíceis que passei e finalmente ao meu irmão Everson de Lima Silva por, mesmo longe, sempre está presente em minha vida me dando forças pra continuar, e aos meus filhos Anna Letícia e Heitor Bernardo que são a razão de tudo.

## AGRADECIMENTOS

À Deus por me dar forças e coragem para continuar, sempre.

Ao meu Orientador Professor Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento por ajudar a organizar minhas ideias, contribuir com as dele, corrigir meus erros, incentivar e entender os momentos difíceis que passei, ajudando-me a crescer intelectualmente.

Ao professor Dr. José Pinheiro Lopez Neto por sua paciência e contribuição intelectual.

A coordenadora Professora Vera Lucia Antunes de Lima, pela imensa ajuda e compreensão.

A Universidade Federal de Campina Grande por ceder seu espaço para o desenvolvimento do meu trabalho.

Ao CNPq pela ajuda financeira.

Aos meus colegas e amigos de curso e na vida, principalmente Ariadne S. Meira, Diego Araújo, Jordânio Inácio, Patrício Leite por me ajudarem sempre, esclarecendo minhas dúvidas e ajudando nos ensaios.

Enfim a todos que me ajudaram de alguma forma a concluir esse trabalho, direta ou indiretamente.

## Resumo

O armazenamento de produtos alimentícios pulverulentos e granulares traz com ele uma das maiores empresas comerciais no mundo hoje, e apresentam contribuições bastante importantes para muitos países. Jenike introduziu a distinção no padrão de fluxo em dois diferentes tipos: fluxo em massa e fluxo em funil, esse termo é usado até os dias atuais. Objetivou – se com essa pesquisa o estudo experimental da vazão e do tipo de fluxo de produtos pulverulentos e granular (farinha de mandioca, painço, açúcar cristal, confeiteiro e demerara) para subsidiar o projeto estrutural em silos. Observou-se que com relação ao índice de fluxo dos produtos (farinha de mandioca, painço açúcar cristal e açúcar demerara) foram classificados como produtos que fluem facilmente, o produto (açúcar confeiteiro) foi classificando como produto coesivo. Ao descarregar a farinha de mandioca seu fluxo não variou de acordo com a inclinação da tremonha, o fluxo foi do tipo de massa para as inclinações de 30° e 45°. O painço teve fluxo tipo de massa de para as tremonhas com inclinações diferentes 30 e 45°. O tipo de fluxo observado no descarregamento do açúcar cristal foi tipo de massa para as duas diferentes inclinações 30 e 45°.O fluxo do açúcar demerara foi tipo funil para a tremonha com inclinação de 60° e não houve fluxo com a tremonha de 45°. Os valores de vazão mássica experimental foram diferentes dos teóricos para todos os produtos. Para os produtos painço, farinha de mandioca e açúcar cristal a inclinação da tremonha que apresentou maior vazão de descarga foi a de 45°, chegando a valores que variam de 18% a 65,52% mais rápida do que outras inclinações de tremonhas que foram comparadas. O açúcar demerara apresentou vazão mássica de 0.458Kg/s para a tremonha com inclinação de 60°, não havendo vazão de descarga para a tremonha com inclinação de 45°.

Palavras – chaves: fluxo, vazão, silo, tremonha, açúcar

## Abstract

The storage of granular and powdered food products brings with it one of the largest trading companies in the world today and presents important contributions to many countries. Jenike introduced the distinction in flow pattern into two different types: mass flow and funnel flow, this term is used for today. The objective of this research was the experimental study of flow and flow of pulverulent and granular products (cassava flour, millet, crystal sugar, confectioner and demerara) to support structural design in silos. It was observed that in relation to the flow index of the products (cassava flour, crystal sugar millet and demerara sugar) were classified as products that flow easily; the product (confectionery sugar) was classified as a cohesive product. When discharging the cassava flour its flow did not vary according to the inclination of the hopper, the flow was of the type of mass for the inclinations of 30 ° and 45 °. The millet had mass flow rate of to the hoppers with different slopes 30 and 45°. The flow rate observed at the unloading of the crystal sugar was mass type for the two different slopes 30 and 45 °. The flow of the demerara sugar was funnel type for the hopper with slope of 60° and there was no flow with the hopper of 45°. The values of experimental mass flow were different from the theoretical ones for all the products. For the products millet, cassava flour and crystal sugar the slope of the hopper with the highest discharge flow was 45 °, reaching values ranging from 18% to 65.52% faster than other slopes of hoppers that were Compared. The demerara sugar presented a mass flow rate of 0.458 kg / s for the hopper with slope of 60°, with no discharge flow to the hopper with a slope of 45 °.

Key words: flow, flow rate, silo, bin, sugar



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais vantagens e desvantagens dos fluxos de massa e funil.....	15
Tabela 2- Classificação do produto armazenado quanto à granulometria.....	20
Tabela 3- – Valores limites da Função Fluxo proposto por Jenike (1964).....	24
Tabela 4 - Classificação do índice de fluabilidade (ffc).....	25
Tabela 5- Limites apropriados para as propriedades físicas.....	
Tabela 6 - Cargas do pré-shear e shea .....	38
Tabela 7- Produtos utilizados com diâmetros de descarga e inclinações .....	40
Tabela 8 - Produtos e suas umidades.....	44
Tabela 9 - Propriedades de fluxo dos produtos granulares.....	46
Tabela 10 - Ângulo de atrito com a parede de acrílico e aço zincado .....	48
Tabela 11- Classificação dos produtos quanto a fluidez .....	49
Tabela 12 - Diâmetro mínimo do orifício de descarga e inclinação (Jenike).....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Tipos de fluxo em silos .....	14
Figura 2 - Variações do tubo no fluxo de funil.....	14
Figura 3 - Formação do efeito tubo Fonte:( Calil Júnior & Cheung,2007) .....	16
Figura 4- Silo com descarga incompleta .....	17
Figura 5 - Aparelho de cisalhamento direto de Jenike.....	18
Figura 6 - Curva característica de (YL) e (EYL).....	21
Figura 7- Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede .....	22
Figura 8 - Função fluxo e Função fluxo com o tempo .....	23
Figura 9 - Produtos utilizados.....	34
Figura 10 - Tremonhas utilizadas .....	35
Figura 11- Silo em modelo reduzido utilizado .....	35
Figura 12- Célula de cisalhamento direto por translação (TSG 70-140).....	36
Figura 13 - Lugar geométrico (YL e EYL), ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito tensão confinada e tensão máxima .....	3
8	
Figura 14 - Gráfico $\sigma \times \tau$ .....	39
Figura 15 - Determinação da função $H(\alpha)$ para tremonhas cônicas e em cunha .....	39
Figura 16 - Curva granulométrica dos produtos utilizados.....	45
Figura 17- Sequência de imagens para o painço 30°.....	51
Figura 18- Sequência de imagens para o painço 45° .....	51
Figura 19 - Sequência de imagens para a farinha de mandioca 30° .....	52
Figura 20 - Vista superior do descarregamento da farinha de mandioca 30° .....	52
Figura 21- Vista superior do descarregamento da farinha de mandioca 45° .....	52
Figura 22 - Vista superior do descarregamento do açúcar cristal 30° e 45° .....	53
Figura 23 - Sequência de imagens para o açúcar confeiteiro com orifício de 0,085m.....	54
Figura 24 - Sequência de imagens para o açúcar confeiteiro com orifício de 0,030m.....	54
Figura 25 - Interferência manual .....	55
Figura 26 - Sequência de imagens para o açúcar demerara com tremonha de 60°.....	55
Figura 27- - Comparativo das vazões para farinha de mandioca.....	56
Figura 28- Comparativo das vazões para painço .....	56
Figura 29- Comparativo das vazões para açúcar cristal .....	57
Figura 30- Comparativo entre valores experimentais e teóricos .....	58
Figura 31 - Comparativo entre valores experimentais e teóricos .....	58
Figura 32 - Curvas de vazão para o descarregamento do painço .....	59
Figura 33 - - Curvas de vazão para o descarregamento da Farinha de mandioca .....	59
Figura 34 - Curvas de vazão para o descarregamento do Açúcar cristal.....	60
Figura 35 - Curvas de vazão para o descarregamento do açúcar confeiteiro .....	60
Figura 36 - Curvas de vazão para o descarregamento do açúcar demerara.....	61

## SUMÁRIO

Resumo .....	v
Abstract.....	vi
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVO .....</b>	<b>12</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1 Padrões de fluxo em silos .....</b>	<b>14</b>
<b>3.2 Problemas relacionados ao projeto de silos .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2.1 Efeito tubo.....</b>	<b>16</b>
<b>3.2.2 Descarga incompleta .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2.3 “Slip - stick”.....</b>	<b>17</b>
<b>3.3 Informações exigidas dos produtos sólidos armazenáveis .....</b>	<b>17</b>
<b>3.3.1 Densidade.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3.2 Teor de umidade.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3.3 Granulometria .....</b>	<b>19</b>
<b>3.3.4 Peso específico consolidado (<math>\gamma</math>).....</b>	<b>20</b>
<b>3.3.5 Ângulo de Atrito Interno (<math>\phi</math>) e Efetivo Ângulo de Atrito Interno (<math>\delta</math>) .....</b>	<b>20</b>
<b>3.3.6 Ângulo de atrito com a parede (<math>\phi_w</math>).....</b>	<b>21</b>
<b>3.3.7 Função Fluxo (FF).....</b>	<b>22</b>
<b>3.3.8. Fator fluxo da tremonha ( ff ) .....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.9. Relação H/D (altura/diâmetro) .....</b>	<b>28</b>
<b>2.5 Vazão de descarregamento em silos .....</b>	<b>29</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODO .....</b>	<b>34</b>
<b>4.1 - Local dos ensaios.....</b>	<b>34</b>
<b>4.2 - Produtos utilizados .....</b>	<b>34</b>
<b>4.3 – Silo em modelo reduzido .....</b>	<b>34</b>
<b>4.4 – Obtenção dos dados .....</b>	<b>35</b>
<b>4.5- Propriedades de fluxo.....</b>	<b>36</b>
<b>4.5.1 Determinação das propriedades físicas dos produtos.....</b>	<b>40</b>
<b>4.5.2 - Teor de umidade.....</b>	<b>40</b>
<b>4.5.3 – Granulometria.....</b>	<b>41</b>
<b>4.6 Modelos teóricos para análise de vazão .....</b>	<b>41</b>

<b>4.6.1 Metodologia de Beverloo et al. (1961)</b> .....	41
<b>4.6.2 Metodologia de Rotter (2001)</b> .....	42
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	44
<b>5.1 Propriedades físicas dos produtos</b> .....	44
<b>5.1.1 Granulometria</b> .....	44
<b>5.2 Propriedades de fluxo</b> .....	45
<b>5.2.1 Peso específico consolidado (<math>\gamma</math>)</b> .....	46
<b>5.2.2 Ângulo de atrito interno (<math>\phi</math>) e Efetivo ângulo de atrito interno (<math>\delta</math>)</b> .....	46
<b>5.2.3 Coesão (C)</b> .....	47
<b>5.2.4. Ângulo de atrito com a parede (<math>\phi_w</math>)</b> .....	48
<b>5.2.5 Função Fluxo (FF)</b> .....	48
<b>5.3 Características de fluxo</b> .....	50
<b>5.4 Comparativo entre os valores teóricos e experimentais de vazão</b> .....	55
<b>5.5 Vazão de descarga</b> .....	58
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	61
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	62
<b>7 – APÊNDICE</b> .....	66

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria de alimentos é uma das maiores setores comerciais no mundo hoje, e apresentam contribuições bastante importantes para muitos países. Inúmeras matérias-primas e produtos nesta indústria são em forma de pó, de partículas ou granulares. A busca por processos mais eficientes que ajudem a indústria de alimentos é de total relevância, a fim de oferecer produtos de alta qualidade. Neste sentido, a competitividade futura pode ser dependente do conhecimento originado por atividades de pesquisa que contribuam para o conhecimento das propriedades que afetam o armazenamento, manipulação e processamento de produtos alimentares.

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.

Cooperativas, produtores e indústrias armazenam grandes quantidades de produtos em espaços reduzidos o que explica como silos são necessários. Além disso, a estocagem se torna imprescindível em termos econômicos na medida em que permite o controle do escoamento da safra e abastecimento, reduzindo a necessidade de importação e também das especulações de mercado

Armazenamento em silos ou em armazéns equipados com eficientes sistemas de termometria, aeração e/ou outros recursos para manutenção de qualidade dos grãos, são as formas mais empregadas por cooperativas, agroindústrias e grandes produtores. Se bem dimensionados e manejados corretamente, esses sistemas podem ser empregados também por médios e pequenos produtores.

A recomendação da FAO (Organizações das nações unidas para agricultura e alimentação) é para que, a capacidade estática de armazenagem de um país seja igual a 1,2 vezes sua produção agrícola anual demonstra que a capacidade estática do Brasil, desde a safra 2015/2016, não acompanha o crescimento da produção agrícola, ou seja, o Brasil sequer tem a capacidade estática igual a sua atual produção e está longe de atender a recomendação da FAO.

O Brasil produziu em 2016 23,71 milhões de toneladas, com uma área colhida de 1,55 milhões de hectares. Em 2017, a previsão é de que a safra seja 12,3% inferior, sendo estimada em 20,80 milhões de toneladas, devido à redução da área plantada observada na maioria dos estados brasileiros.

A farinha de mandioca é produto oriundo majoritariamente da agricultura familiar, porém, ainda não muito valorizada, sobretudo pela falta de padronização das propriedades físicas.

No que diz respeito ao açúcar, atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial,. No mercado internacional, o Brasil é o maior exportador com 45% da produção mundial

A necessidade de se aumentar à capacidade de armazenamento e de atender às solicitações das empresas de processamento demonstra a importância do estudo da problemática de unidades armazenadoras, para o desenvolvimento de novas tecnologias e soluções dos problemas existentes.

A tecnologia empregada nas atividades agrícolas permite produzir, não apenas maior quantidade por unidade de área e de melhor qualidade, como também em épocas e regiões distintas das tradicionalmente conhecidas. Em consequência, os períodos de colheita se estenderam no decorrer do ano com épocas coincidentes, ocorrendo um crescimento substancial da demanda pela modernização da atual infraestrutura de armazenagem e transporte, visando um eficiente sistema logístico para escoamento das safras.

O estudo do fluxo é de fundamental importância para subsidiar o projeto estrutural e o tipo de fluxo em silos, como também para avaliar o escoamento dos sólidos evitando a obstrução do fluxo no descarregamento, o que acarreta invariavelmente prejuízos às indústrias. Os estudos realizados sobre as vazões em silos, em geral detectam problemas encontrados nas indústrias, tais como a formação de arcos coesivos e interrupção da descarga do silo, provocando parada total ou parcial em determinado setor de produção, e ou distribuição. Isto acarreta prejuízos devido ao aumento dos custos de produção

## 2. OBJETIVO

### Objetivo geral

Objetivou – se o estudo experimental da vazão e do fluxo de produtos pulverulentos e granular para subsidiar o projeto estrutural em silos.

### Objetivo específico

- ». Determinar as propriedades físicas (massa específica, granulometria) e de fluxo (ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito do produto com a parede) de cinco produtos, farinha de mandioca, painço e três açúcares (cristal, confeito e demerara) (AC1, AC2 e AC3);
- ». Avaliar o comportamento do fluxo das partículas em modelo reduzido de silo cilíndrico e tremonhas com diferentes ângulos de inclinação (30, 45 e 60°);
- ». Determinar a vazão de descarga dos produtos com diferentes inclinações da tremonha (30, 45 e 60°).

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Padrões de fluxo em silos

Jenike (1964) introduziu a distinção no padrão de fluxo em dois diferentes tipos: fluxo em massa e fluxo em funil, e esse termo é usado até os dias atuais. Um silo é caracterizado como um silo de fluxo em massa, quando todo o material se encontra em movimento dentro do mesmo durante a descarga. Fluxo em funil é definido como o padrão de fluxo, onde alguns dos materiais no interior do silo permanecem parados durante a descarga, formando um canal que se estende até a superfície superior onde os sólidos deslizam. Posteriormente o fluxo em funil temos o fluxo misto Rotter (2001) tal como mostrado na Figura 1.

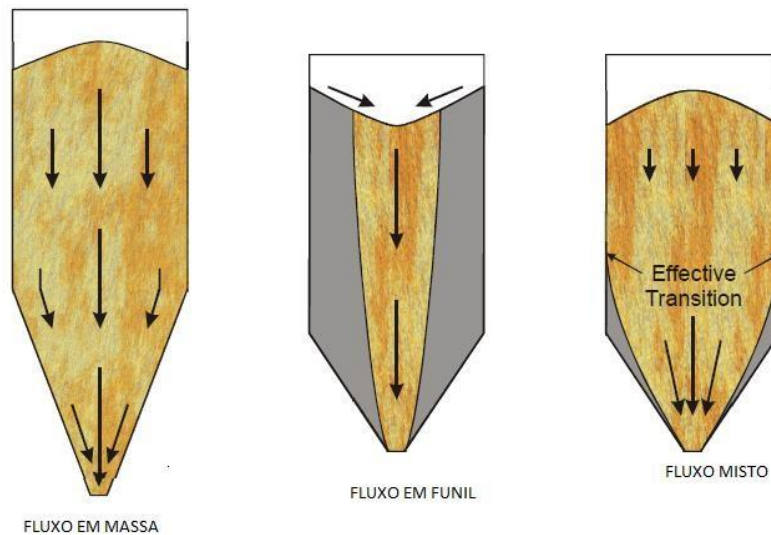


Figura 1- Tipos de fluxo em silos

Para o fluxo de funil, o tubo formado no seu interior no processo de descarregamento pode, ainda, assumir diferentes configurações como visto na Figura 2

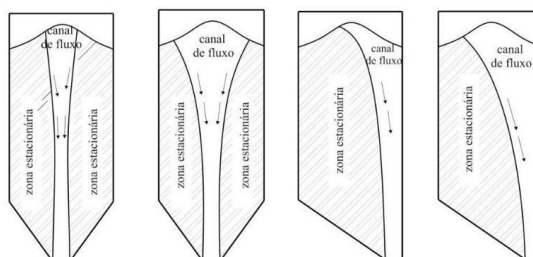


Figura 2 - Variações do tubo no fluxo de funil

Fonte: Calil Júnior & Cheung (2007)

O fluxo misto é caracterizado pelo movimento de todas as partículas da massa ensilada em uma parte do silo juntamente com a formação do efeito tubo em outra parte.



Para os dois tipos básicos de fluxo, Calil júnior & Cheung, (2007) listaram na Tabela 1 as principais vantagens e desvantagens de forma a permitir uma escolha coerente do sistema desejado de armazenamento e processo.

Tabela 1 - Principais vantagens e desvantagens dos fluxos de massa e funil.

FLUXO DE MASSA		FLUXO DE FUNIL	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Vazão regular	Altas tensões na transição	Menor altura da tremonha	Flutuações na vazão
Efeito de segregação radial é reduzido com a melhora da homogeneidade	Desgaste superficial da parede	Diminuição das pressões dinâmicas na região da	Efeitos de consolidação com o tempo podem causar obstruções
Campo de Tensões mais previsível	São necessárias tremonhas mais profundas	Menor desgaste superficial da	Grande favorecimento ao colapso
Toda capacidade é utilizada	Maior energia de elevação		Redução da capacidade de armazenagem
	As partículas devem resistir à queda de		Formação de tubos
	Maior capacidade de armazenagem, não possui regiões com produto estagnados		Picos de pressões na região da transição efetiva

Fonte: Calil júnior & Cheung (2007)

### 3.2 Problemas relacionados ao projeto de silos

Rotter (2001) apresenta quatro problemas que regularmente aparecem no projeto e funcionamento dos silos:

3.2.1 A integridade estrutural do silo pode ser comprometida pelas pressões as quais podem ser muito altas, muito baixas ou muito assimétricas;

3.2.2 O produto armazenado pode permanecer estagnado ou ocorrer fluxo com configuração irregular; O processo de carregamento ou tipo de fluxo pode causar segregação da massa ensilada;

3.2.3 A descarga do silo pode gerar ruídos ou vibrações indesejadas.

Os principais problemas funcionais, segundo Rotter (2001), são os fenômenos conhecidos como: arqueamento sobre o orifício de descarga da tremonha, efeito tubo e a descarga incompleta, sendo estes os mais observados e geralmente responsáveis por irregularidades no fluxo.

### 3.2.1 Efeito tubo

O efeito tubo ocorre substancialmente no fluxo de funil sendo caracterizado pela estagnação e conservação de toda a massa ensilada adjacente ao canal de fluxo e ao longo de toda a altura do silo mesmo após o término do esvaziamento do silo, como pode ser visto na Figura 3

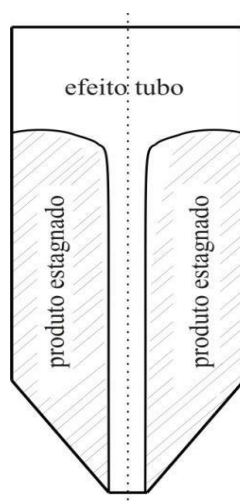


Figura 3 - Formação do efeito tubo

Fonte:( Calil Júnior & Cheung,2007)

### 3.2.2 Descarga incompleta

Ocorre devido à permanência de parte da massa armazenada no interior do silo. Suas consequências, assim como no efeito tubo, vão desde a perda de capacidade efetiva de armazenagem o que resulta em perdas econômicas até possíveis contaminações uma vez que uma mesma quantidade de produto pode permanecer no interior do silo por um período superior ao desejado como no caso de perecíveis como leites em pó, farinhas e outros compostos alimentícios Batista (2009). Figura 4

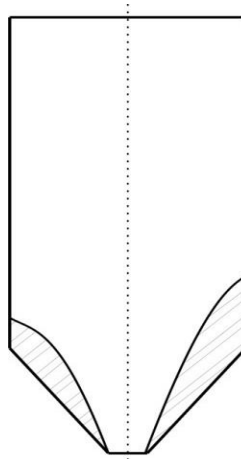


Figura 4- Silo com descarga incompleta  
Fonte: ( Calil Júnior & Cheung,2007)

### 3.2.3 “Slip - stick”

Alguns pós finos apresentam características de escorrega - para (“slip - stick”), isto é, um movimento brusco para-inicia, que aparece durante consolidações ou testes. O comportamento “slip - stick” aparece também em partículas de dimensões relativamente uniformes em superfícies rugosas. Nestes casos, a força cisalhante não se estabiliza após a ruptura conforme a BMHB (1985) e Schwab *et al.* (1991) que observaram o comportamento “slip- stick” durante seus estudos de ações em cabos de temperaturas imersos em fluxo de grãos.

Molenda *et al.* (1994) observaram o comportamento “slip-stick” durante seus estudos de efeitos de desgaste em ações nas paredes. Foi creditado a (Bowden & Leben,1939) o primeiro uso do termo “slip- stick”. Bowden (1950) & Tabor (1964) forneceram a explicação de que o comportamento “slip-stick” ocorre por causa da fricção estática entre as superfícies enquanto que o “stick” é maior que a fricção cinética durante o “slip”. O comportamento “slip-stick” também pode ocorrer se a força friccional entre as superfícies decresce enquanto a velocidade cresce.

### 3.3 Propriedades físicas e de fluxo

Com o aumento da quantidade e variedade de pós sendo produzidos na indústria, existe uma necessidade de informação sobre a sua manipulação e características de processamento, especialmente para pós de alimentos, devido à sua complexidade E. Teunou, J.J Fitzpatrick,(1999).

Os pós ou materiais granulares pode ser produzida com uma variedade de diferentes propriedades físicas tendo suas propriedades de fluxo atendidas pelas determinações de Jenike<sup>XV</sup>

(1964) que deu grande contribuição científica ao desenvolver um aparelho de cisalhamento direto apropriado para produtos sólidos Figura 5

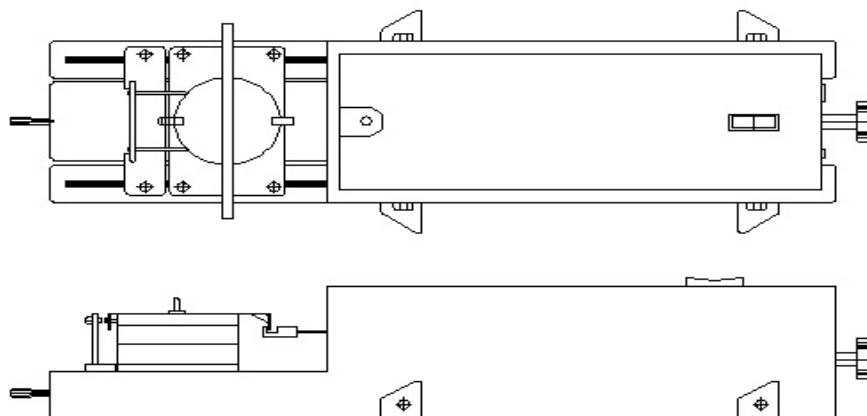


Figura 5 - Aparelho de cisalhamento direto de Jenike

Fonte: Batista (2009)

- O esquema desenvolvido permite determinar uma propriedade física como : densidade e as principais propriedades de fluxo como: peso específico consolidado ( $\gamma$ ); ângulo de atrito interno ( $\phi$ ); efetivo ângulo de atrito interno ( $\delta$ ); e ângulo de atrito do produto com a parede ( $\phi_w$ ).

A seguir serão descritas essas propriedades e outras que não são determinadas diretamente pelo aparelho de Jenike ( 1964):

### 3.3.1 Densidade

Segundo Calil Junior (1984), a densidade do produto não pode ser usada como fator de fluxo; não há uma relação linear direta entre fluxo e densidade, entretanto, a densidade de um produto precisa ser calculada visto tratar de um parâmetro importante para determinação do fluxo e das pressões em silos.

### 3.3.2 Teor de umidade

A umidade, em certas condições, pode contribuir como um facilitador do escoamento de determinados produtos pulverulentos armazenados em silos uma vez que pode atuar como um lubrificante ou impedir a formação de forças de atração eletrostática entre as partículas reduzindo a coesividade e o atrito interno e, portanto, evitando a interrupção do próprio escoamento segundo Naka (2010). Porém, para Palma (2005), a capacidade de fluir (fluidez)<sup>XV</sup>

de alguns produtos armazenados, geralmente grãos finos (partículas menores que 100  $\mu\text{m}$ ), torna-se pior com o aumento da umidade.

### 3.3.3 Granulometria

A análise granulométrica clássica de um produto granular é desenvolvida pelo método de peneiramento, o qual permite classificar o produto em função dos diâmetros de suas partículas. Para a classificação do tamanho das partículas constituintes do produto se utiliza a escala granulométrica da ABNT (NBR 6502/95). É importante mencionar que a condição do fluxo de um produto que contém 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 (Teixeira, 2006).

De acordo com a recomendação de Calil Júnior (1984), pode-se classificar o produto armazenado em função do diâmetro das suas partículas, como pode –se observar na Tabela 2

Tabela 2-Classificação do produto armazenado quanto à granulometria.

Diâmetro (D) das partículas sólidas	Classificação do produto armazenado
$D > 0,42\text{mm}$	Granulares
$0,42 \leq D \leq 0,149\text{mm}$	Pulverulentos coesivos
$0,149 < D \leq 0,074\text{mm}$	Pulverulentos coesivos finos
$D < 0,074\text{mm}$	Pulverulentos coesivos extra finos

Fonte: adaptado de: (Callil,1984).

### 3.3.4 Peso específico consolidado ( $\gamma$ )

Garbazza (2011) define o peso específico consolidado ( $\gamma$ ), como a quantidade de massa de partículas sólidas dividida pelo seu volume total e multiplicado pela aceleração da gravidade ( $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ ).

### 3.3.5 Ângulo de Atrito Interno ( $\phi$ ) e Efetivo Ângulo de Atrito Interno ( $\delta$ )

O ângulo de atrito interno refere-se às condições internas do produto armazenado, dependendo do nível de pressões médias aplicado a todos os grãos. O aumento das pressões de confinamento irá tornar a amostra do produto mais densa. Dessa forma o ângulo de atrito interno aumenta com o peso específico ou com a diminuição do índice de vazios (Nascimento, 2008).

O efetivo ângulo de atrito interno é uma medida da fricção entre as partículas, que depende da rugosidade, da forma e do tamanho das partículas. Para materiais não coesivos, o ângulo efetivo de atrito interno coincide com o ângulo de atrito interno, quando acontece o escoamento livre do material (Campos, 2012).

Na obtenção desses ângulos se faz necessário entender o ensaio de cisalhamento da amostra, o qual é realizado por meio da célula Jenike. O círculo de tensões de Mohr é uma representação gráfica Figura 6 do estado de tensão em um ponto do meio contínuo, sendo extremamente útil para problemas de tensão e deformação (Ortigão,1993).

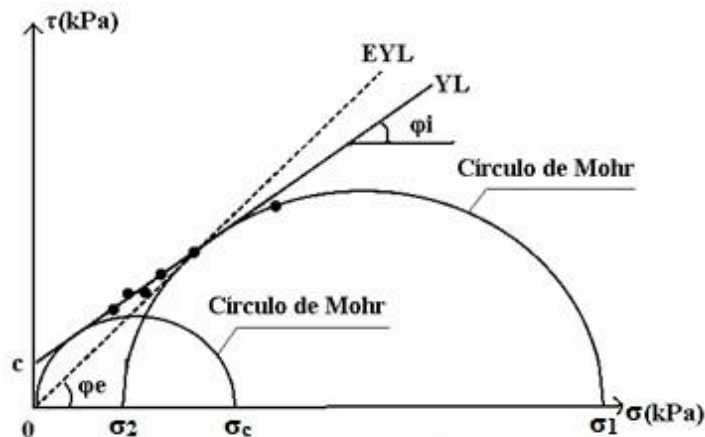


Figura 6 - Curva característica de (YL) e (EYL).

O lugar geométrico de deslizamento (YL) é uma função do grau de consolidação da amostra, sendo obtido quando o elemento do produto armazenado é cisalhado. É determinado pela envoltória de resistência, que é a relação entre a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) e a tensão normal ( $\sigma$ ), representado pela curva que tangencia os círculos de tensões de Mohr, construídos com as tensões principais atuantes no produto (Schulze, 1998).

O efetivo lugar geométrico de deslizamento (EYL) mostrado na Figura 6 foi introduzido por (Jenike,1964), sendo representado por uma reta tangente ao círculo de tensões do fluxo de estado estável e passando pela origem. Quanto à tensão de cisalhamento é importante mencionar que sua existência se deve ao atrito entre massa/massa e a interseção do YL com o eixo da tensão de cisalhamento descreve a tensão de coesão ( $c$ ) de um estado não consolidado, ou seja, a coesão é a tensão de cisalhamento sob tensão normal nula (Schulze, 1998).

### 3.3.6 Ângulo de atrito com a parede ( $\phi_w$ )

O critério para condições de deslizamento do produto ao longo da parede pode ser expresso como a relação entre a tensão de cisalhamento ( $\tau_w$ ) e a tensão normal à parede<sup>xx</sup>

( $\sigma_w$ ), chamada de lugar geométrico de deslizamento na parede (WYL).

O atrito entre o produto e a parede do silo ocorre quando este 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 (Benink, 1989).

O lugar geométrico de deslizamento na parede, WYL, para produtos de fluxo livre, pode ser obtido por uma linha direta que passa pela origem, como mostrado pela linha “a” na Figura 7. No caso de produtos coesivos, o WYL é uma linha direta com uma ordenada  $C_w$ , como ilustrado pela linha “b”. Em alguns casos, a combinação entre a parede e o produto não segue exatamente este conceito ideal e um WYL com pouca curvatura é obtido, como dado pela linha “c”. O ângulo de inclinação da reta que define o lugar geométrico de deslizamento da parede é denominado ângulo de atrito do produto com a parede ( $\theta_w$ ) cujo valor de sua tangente expressa o coeficiente de atrito produto- parede ( $\mu$ ).

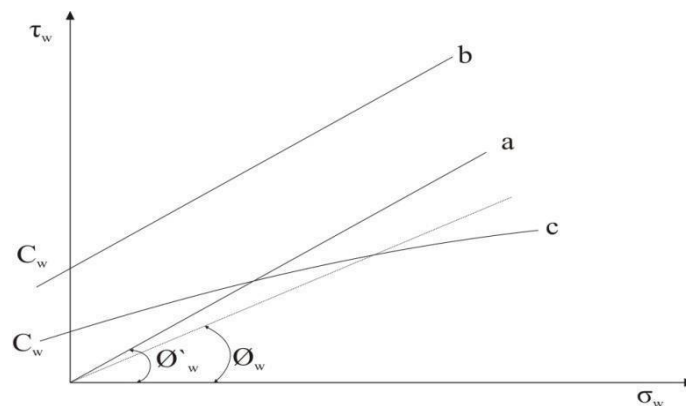


Figura 7- Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede

A determinação deste ângulo é importante tanto para o fluxo como para o cálculo das pressões e deve ser determinada 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, é presente a necessidade a determinação do mesmo em função do tempo para se tiver valores confiáveis (Freire,2004).

### 3.3.7 Função Fluxo (FF)

Nascimento (2008) descreve a função fluxo (FF) como um indicativo da capacidade do produto armazenado de fluir, sendo representada pela relação entre a tensão principal máxima

de consolidação ( $\sigma_1$ ) e a tensão inconfina ( $\sigma_{ic}$ ), como é observada na Figura 8. Sendo a FF é normalmente utilizada para caracterizar numericamente a fluidez dos produtos armazenados, assim é de suma importância nos projetos de silos, conhecer a função fluxo (FF) e a função fluxo com o tempo (FFt), que devem ser conhecidas para prevenir os problemas de fluxo.

A maneira como um produto armazenado flui, tem relação de dependência direta com nível de tensão de consolidação, portanto quanto maior a tensão de consolidação, maior será a função fluxo, o que conduz a um melhor fluxo do produto, segundo Prescott (2000) não é possível descrever a fluidez do produto armazenado por um valor único ou um índice, pois a fluidez é o resultado da combinação das propriedades físicas dos produtos com as dos equipamentos usados para manipulação, armazenagem ou processamento do produto.

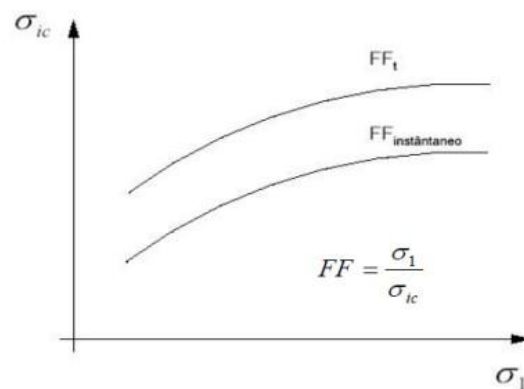


Figura 8 - Função fluxo e Função fluxo com o tempo Fonte : (Nascimento, 2007)

Com vista à determinação da função fluxo (FF) é feita uma relação direta entre a pressão de consolidação ( $\sigma_M$ ) e a resistência inconfina ( $\sigma_C$ ), como expressam a Equação 1 e a Figura 8

$$FF = \frac{\sigma_M}{\sigma_C} \quad \text{Eq.1}$$

Para uma estimativa rápida e a contento Jenike (1964) propõe uma análise do comportamento de fluxo do produto no qual classifica sua fluidez do produto relacionando-a a valores limites, como o apresentado na Tabela 3.



Tabela 3- – Valores limites da Função Fluxo proposto por Jenike (1964).

Função Fluxo	Análise da Fluidez
FF < 2	Produto muito coesivo, não flui
2 < FF < 4	Produto coesivo
4 < FF < 10	Produto que flui facilmente
FF > 10	Produto de fluxo livre

Fonte: Adaptado de (Costa, 2013)

O tempo de armazenamento, o teor de umidade, a temperatura e principalmente a tensão de consolidação, são fatores que influenciam na determinação da função fluxo. Segundo Palma (2005) cada produto armazenado tem suas próprias função fluxo e função fluxo com o tempo. Produtos sem coesão, de fluxo livre, geralmente não causam problemas de fluxo, porém quando o produto é fino (partículas menores que 100 µm) e sujeito a consolidação, tornando-se pior com o aumento da umidade e do tempo armazenamento, fazendo com que a possibilidade de obstrução ao fluxo aumente sensivelmente

### 3.3.8 Fator fluxo da tremonha ( ff )

A função fluxo na tremonha foi bem definida por Calil Junior et al. (1997) como sendo o fator indicativo da fluidez no canal, para eles, quanto maior a tensão máxima de consolidação em um canal, menor a tensão máxima principal atuando na obstrução e menor será a fluidez no canal, ou seja, quanto menor o valor do fator fluxo é a fluidez do canal. Ao contrario da função fluxo (FF), a função fator fluxo da tremonha (ff) é uma função dependente das propriedades do conjunto silo e produto, levando em conta as propriedades do silo (forma da tremonha, geometria, ângulo de atrito com a parede) e das propriedades físicas do produto armazenado, de acordo com Palma (2005), sendo representado pela relação entre a tensão principal máxima de consolidação ( $\sigma_1$ ) e a tensão que atua em um arco estável imaginário, formado por partículas do produto, sustentado pelas paredes da tremonha ( $\sigma_1''$ ), ou seja ,

$$ff = \sigma_1 / \sigma_1'' \quad \text{Eq. 2}_{xx}$$

O cálculo do fator de fluxo na tremonha (ff) supõe a solução das equações diferenciais

representativas das tensões que surgem nos silos durante a descarga. Tais resoluções foram publicadas por Jenike (1971), para silos de diferentes geometrias, na forma de gráficos denominados de gráficos de fatores de fluxo, na figura 20 apresenta-se um exemplo dos gráficos propostos por Jenike. Enstad (1975) desenvolveu um conjunto de equações que permite calcular o fator fluxo com boa aproximação:

Um parâmetro bastante importante para o estudo da fluidez dos produtos armazenados é o fator de fluxo da tremonha ( $ff$ ) que diferentemente da Função Fluxo do produto ( $FF$ ), é uma propriedade do conjunto silo-produto, dependendo de algumas características de ambos (Palma,2003)

Jenike (1964) constatou, ao observar o comportamento da escoabilidade dos produtos armazenáveis, que esta é inversamente proporcional à inclinação da reta que a função fluxo forma com a horizontal. Esta observação foi chamada, pelo autor, de índice de fluabilidade ( $ffc$ ), em que este pode variar de uma ausência total de fluxo até outra caracterizada como fluxo livre, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação do índice de fluabilidade ( $ffc$ )

Tipos de fluxo	Índice de fluabilidade ( $ffc$ )
Sem fluxo	$ffc < 1$
Coesivo	$1 < ffc < 2$
Fácil	$4 < ffc < 10$
livre	$ffc > 10$

Fonte: Adaptado de (Lopez Neto & Nascimento,2013)

Garbazza (2011), afirma que a capacidade de escoar de alguns produtos armazenados, geralmente grãos finos (partículas menores que  $100 \mu m$ ), torna-se pior com o aumento da umidade e do tempo de armazenamento aumentando a possibilidade de ocorrência das obstruções de fluxo.

Enstad (1981) desenvolveu um conjunto de equações que permite calcular o fator fluxo com boa aproximação:

$$F(\theta) = \left( \frac{65}{220 - \theta} \right)^m \left( \frac{200}{290 - \theta} \right)^{1-m} \quad \text{Eq.3}$$

$$X = \left[ \frac{2^m \text{sen} \phi i u}{1 - \text{sen} \phi i u} \right] \left[ \frac{\text{sen}(\alpha + \beta) + \text{cos} \theta}{\text{cos} \theta} \right] \quad \text{Eq.4}$$

$$\alpha = \beta + 90 - \theta \quad \text{Eq.5}$$

$$Y = \left[ \frac{[(2 - 2 \cos \alpha)^m (a^{1-m}) (\cos \theta) + (\sin \beta) (\sin \alpha)^{1+m}]}{(1 - \sin \phi_{iu}) (\sin \alpha)^{1+m}} \right] \quad \text{Eq.6}$$

$$ff = \frac{Y(1 + \sin \phi_{iu})}{2(x - 1)F(\theta) \cos \theta} \quad \text{Eq.7}$$

Para o cálculo do ângulo de inclinação mínimo da tremonha com a horizontal ( $\theta_m$ ), utilizam-se as seguintes equações de Enstad (1981):

$$\theta_m = 0,5 * \cos^{-1} * (1 - \sin \phi_{iu} | 2 \sin \phi_{iu}) + \beta \quad \text{Eq. 8}$$

Ainda para a determinação do coeficiente do ângulo de atrito com a parede lançou-se da Equação 14 que segue:

$$\mu = \tan \phi_w \quad \text{Eq.9}$$

### 3.3.9 Relação H/D (altura/diâmetro)

Dentre os diversos parâmetros de classificação dos silos, é aceito pela grande maioria das normas existentes sua diferenciação conforme geometria espacial, sendo observada a relação entre a altura efetiva do produto armazenado (H) e o maior diâmetro (D) inscrito em uma circunferência do silo. Entretanto, notam-se grandes variações em seus valores.

Calil Júnior & Cheung (2007) subdividiram os silos verticais, esbeltos e baixos, em função da relação das dimensões altura e diâmetro resultando em uma classificação da forma:

- Silos esbeltos: aqueles que possuem uma relação entre a altura e o diâmetro

$$\left(\frac{H_c}{D_c}\right) \geq 1,5;$$

- Silos baixos: aqueles que possuem uma relação entre a altura e o diâmetro

$$\left(\frac{H_c}{D_c}\right) < 1,5.$$

- b) Silos horizontais: aqueles cuja dimensão longitudinal é preponderante sobre as outras dimensões.

### 3.4 Vazão de descarregamento em silos

A vazão de descarregamento está intrinsecamente relacionada à velocidade com que o produto armazenado se movimenta em direção ao orifício de descarga o que a torna uma variável de importância fundamental; por sua vez, a velocidade de descarregamento depende do tipo de fluxo desenvolvido e, por consequência, das propriedades do produto armazenado e das características geométricas dos silos.

Predizer e, sobremaneira, poder controlar a vazão de descarga de um silo significa poder prever com clareza o tempo máximo demandado para seu total esvaziamento bem como a possibilidade de uso em situações que requerem descargas parciais extremamente controladas, como no caso de sistemas de dosagem industrial situações em que flutuações na vazão de descarga podem representar perda de eficiência de trabalho e aumento dos custos de produção.

Para o caso do fluxo de massa sabe-se que flutuações na vazão de descarga são mínimas devido à sua característica de perfil de fluxo bem definido e à não ocorrência de zonas estagnadas, contudo, a obtenção do fluxo de massa só é possível, em geral, quando se descarrega um produto granular de baixas coesão e atrito interno por um silo com tremonhas de elevado grau de inclinação, em que sua desvantagem é direcionada às ações inerentes ao descarregamento, silos com fluxo de massa tendem a sofrer maiores ações pelo fato de todo produto se movimentar ao mesmo tempo em seu interior transmitindo, às paredes e ao fundo, suas máximas pressões.

Inversamente ao fluxo de massa, o controle de vazão em um silo com fluxo de funil é extremamente difícil em virtude do seu perfil desuniforme e variável. A existência de zonas estagnadas e o modo aparentemente desordenado de deformação do produto em seu interior no sentido do orifício de descarga o tornam, na maioria dos casos, um tipo de fluxo indesejável, o

fluxo de funil tende a ocorrer com produtos pulverulentos e de alta coesão descarregados em silos de paredes rugosas com fundo plano ou tremonha pouco inclinada.

Por outro lado, as ações nas paredes e fundo do silo podem, a princípio, ser menos intensas que no fluxo de massa já que o produto, ao ser descarregado, tende a se deslocar em partes, separadamente, significando que apenas uma porção de produto se movimenta por vez, aliviando a transferência de esforços para a estrutura do silo, fato por que o fluxo de funil seria estruturalmente mais recomendado, contudo, o fenômeno de formação de arcos coesivos e efeito tubo potencializa sua periculosidade estrutural já que a ruptura repentina dessas camadas compactadas causa enormes sobrecargas na estrutura; queda de arcos coesivos ou das paredes resultante do efeito tubo tem sido a causa de grande parte dos acidentes registrados com silos ao redor do mundo.

A pressão causada pelo desprendimento de uma camada compactada no interior do silo pode ser compreendida como uma carga acidental de elevada intensidade e curta duração; esta pressão tende a solicitar as paredes dos silos, em geral na zona de transição parede – tremonha ao mesmo tempo em que surge um efeito de sucção acima da superfície do produto solicitando sua cobertura; a ocorrência dessa carga acidental repetidas vezes pode contribuir para o enfraquecimento da estrutura ao longo do tempo e conseqüente redução de sua vida útil.

Segundo Hirshfeld e Rapaport (2001), vários estudos foram efetuados com objetivo de relacionar a vazão em silos com as dimensões do orifício de descarga e desses trabalhos foi possível estabelecer que:

- A vazão de descarga não depende da altura da massa armazenada  $H$ , prevendo uma relação  $H > 2,5D$ , em que  $D$  é o diâmetro do silo,
- A vazão de descarga independe de  $D$  se ambos  $D > 2,5D$  e  $D > B + 30d$ , sendo  $B$  e  $d$  a abertura do orifício de descarga e o diâmetro médio das partículas do produto armazenado, respectivamente;
- Existe também uma conexão entre a dimensão do orifício de descarga e o diâmetro das partículas, assumindo que o diâmetro das partículas não seja demasiado pequeno,  $D > 6d$ , o fluxo ocorrerá sem maiores problemas e, caso a relação seja  $D < 4d$ , haverá interrupção do fluxo.

De acordo com a afirmação acima, parâmetros como  $B$  e  $g$  (aceleração da gravidade) podem afetar a vazão de descarga; através de algumas análises prever-se, que para um valor de  $B$  não elevado, que a vazão de descarga pode ser tomada como  $g^{1/2}B^{5/2}$ ; devido ao tamanho das partículas deve-se assumir o tamanho efetivo da abertura de descarga, não como  $B$ , mas  $B - kd$ ,

em que  $kd$  seria a largura do então chamado “*empty annulus*” e  $k$  o número de sequências que deveria ser determinado experimentalmente para cada produto; a vazão de descarga seria dada, então, Equação 10.

$$\frac{dN}{dt} = C\rho g^{\frac{1}{2}}(B - kd)^{\frac{1}{2}}$$

Eq. 10

Em que  $\rho$  seria a densidade do produto próximo à saída e  $C$  uma constante dependente do tipo de produto. Os parâmetros  $C$  e  $k$  dependem da natureza do material particulado, assumindo normalmente os valores de 0,58 e 1,5, segundo (Verghese e Nedderman, 1995)

Segundo Zuriguel *et al.* (2009) comentam que o termo  $B^{5/2}$  deve ser empregado em casos de análises de descargas tridimensionais e, para o estudo bidimensional, a vazão de descarga é uma função de termo  $B^{3/2}$ .

$$W = C\rho g^{0,5}(B - kd)^{3/2}$$

Eq,11

Esta equação é conhecida como Lei de Beverloo e pode ser obtida através de uma análise dimensional; em adição ficou explicado que acima do orifício de descarga há uma zona de queda livre de partículas limitada, por um arco e, acima do arco, as partículas se encontram compactadas pelo peso das camadas superiores; abaixo do arco as partículas aceleram livremente sobre a influência da gravidade e tendem a ser descarregadas.

Se a dimensão desse arco for, de certo modo proporcional à dimensão do orifício de descarga, a velocidade das partículas atravessando esse orifício,  $v_g$ , pode ser obtida calculando-se a velocidade de uma partícula caindo sem a velocidade inicial a partir de uma distância proporcional ao orifício de descarga:  $v_g \propto D^{1/2}$ , sabendo-se que, em uma análise bidimensional  $W \propto D v_g$ , a vazão de descarga deve ser proporcional a  $B^{3/2}$

Algumas variações nesse comportamento foram reportadas por Mankoc *et al.* (2007) ao estudarem a vazão em pequenos orifícios para ambas as análises bi e tridimensionais, em que os autores citam que essas variações se tornaram evidentes quando a vazão de descarga foi medida para uma larga faixa de dimensões de saída, sendo possível propor uma modificação na equação original de Beverloo, incluindo um termo exponencial que permitiu um ajuste empírico dos valores de vazão para todos os orifícios estudados

$$W = C' \left( 1 - \frac{1}{2} e^{-b(R-1)} \right) (R - 1)^{3/2}$$

Eq.12

W seria a vazão de descarga em número de porções/s, C' e b parâmetros de ajuste e R o tamanho da saída, normalizado pelo diâmetro das partículas. Os resultados de suas pesquisas mostraram que essas variações estavam bastante relacionadas com o surgimento de eventos na vazão para pequenos orifícios e que esses eventos consistiam em lapsos de tempo durante o qual o fluxo era temporariamente interrompido em virtude da formação de um arco instável e, por isso, incapaz de pausar o fluxo permanentemente, afirmar-se então que para pequenos orifícios, interrupções temporárias do fluxo se tornam estaticamente relevantes e provocam uma redução significativa da vazão média o qual se difere do comportamento previsto pela equação original de Beverloo.

Segundo Sielamowicz, Czech *et al* (2011) utilizaram um modelo cinético desenvolvido por( Choi et al.,2005) para avaliar a velocidade das partículas, sendo descarregadas em um silo transparente, Equação 13

$$v(x, y) = \frac{W}{\sqrt{4\pi bz}} e^{-\frac{x^2}{4bz}}$$

Eq. 13

Onde  $v(x,z)$  denotaria a velocidade em determinado ponto, W a vazão de descarga e z a altura do ponto a ser considerado; a constante de proporcionalidade b foi denominada por Choi et al. (2005) de “comprimento de difusão”, mas é comumente conhecida como parâmetro cinemático. (Sielamowicz, Czech e Kowalewski,2011) citam que a equação acima foi desenvolvida para um sistema semi-bidimensional semi-infinito ( $-\infty < x < +\infty$ ) cujo orifício for considerado um ponto em  $z = 0$ .

O modelo cinético desenvolvido por Choi *et al* ( 2005) é capaz de prever a velocidade com apenas um parâmetro b sendo determinado como proporcional ao diâmetro do grão. Medina et al. (1998) investigaram a variação desse parâmetro cinético em um silo com auxílio de imagens de alta definição e concluíram que seu valor deve variar entre 1,5 e 4d, enquanto Samadani, Pradhan e Kudrolli (1999) propuseram um valor constante de 3,5d.

Sielamowicz, Czech e Kowalewski (2010) utilizaram um modelo cinético empírico para avaliar a distribuição da velocidade vertical de fluxo de sementes de painço, usando a Equação 13

$$V_y = e^{A+Bx+Cx^2} = De^{Bx+Cx^2}$$

Eq. 14

Os autores excluíram o termo  $Bx$  devido à simetria de fluxo; propuseram, então que ao analisar a velocidade de fluxo a seguinte descrição para a velocidade vertical definida como um modelo cinético empírico poderia ser descrito como na Equação 15:

$$V_Y(X) = Ae^{Bx^2}$$

Eq. 15

Onde A e B são parâmetros determinados pelo método dos quadrados mínimos cujas unidades são mm/s e  $\text{cm}^{-1}$ , respectivamente, enquanto a distância x do eixo de simetria é dada em cm e a velocidade  $V_y(x)$  em mm/s.

Sielamowicz, Czech e Kowalewski (2011) fizeram uma análise da velocidade de fluxo por um modelo cinético empírico modificado apresentado na Equação 16

$$V_Y(X) = A(e^{Bx^2} + e^{-Cx^2})$$

Eq. 16

Usando uma regressão não-linear (método de Newton-Gauss), os parâmetros A, B e C foram determinados para diferentes alturas e um novo valor de vazão pode, então, ser calculado sendo, a partir de então, estatisticamente mais precisos que os obtidos pelo modelo proposto por (Choi et al.,2005).

Os autores concluíram, também, que o parâmetro cinético b dependia da altura da massa ensilada e variava consideravelmente na vizinhança do orifício de saída, atingindo seus valores máximos nessa região. Cerca de 10 cm acima do orifício, entretanto, o aumento do parâmetro b tornava-se imperceptível e divergente dos valores apresentados por ( Medina et al,1998).

### 3.5 Protótipos e modelos reduzidos

O uso de modelos em escala, para o estudo do comportamento de fenômenos físicos de um sistema, se ampliou com o desenvolvimento da teoria da similitude a partir da metade do século XIX. Este desenvolvimento ocorreu, principalmente, devido à necessidade de compreender o comportamento dos fenômenos físicos envolvidos nas novas tecnologias geradas, principalmente na indústria aeronáutica e naval.



Um fator importante na confecção de modelos reduzidos é a relação entre o custo e a exatidão ou qualidade. Como o custo aumenta com a exigência da exatidão do modelo, é necessário estabelecer o padrão que atenda aos objetivos propostos. (Költzsch e Walden, 1990)

No processo de construção do conhecimento científico o uso de modelos vem sendo utilizado há muito tempo como elo de ligação entre o experimento e a teoria . Neste processo, entende-se por modelo produções e reproduções físicas ou idealizadas, de processos, estruturas e objetos, utilizando homologia ou analogia. Na homologia o original e o modelo apresentam as mesmas qualidades físicas básicas, sendo que a diferença entre ambos é sobretudo quantitativa na sua forma. O uso da homologia resulta em modelos fisicamente semelhantes. Diferentemente, na analogia o original e o modelo apresentam qualidades físicas básicas distintas, mas têm em comum características funcionais e estruturais. O uso da analogia resulta em modelos fisicamente análogos (Murphy,1950; Költzsch e Walden, 1990).

O original e o modelo são semelhantes quando todas as grandezas características homologas apresentarem uma relação constante entre si, ou seja, existirem constantes de similitude para elas. Estas constantes de similitude ( $c_s$ ) podem ser definidas para todas as grandezas básicas de um sistema de medidas, como por exemplo comprimento, espessura, diâmetro e no caso de silos inclinações.

## 4 MATERIAIS E MÉTODO

### 4.2 - Local dos ensaios

O experimento foi realizado no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LaCRA) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), campus de Campina Grande – PB, no período de Junho a Novembro de 2015.

### 4.3 - Produtos utilizados

Foram utilizados os seguintes produtos nessa pesquisa: farinha de mandioca seca fina tipo 1 (Figura 9A), painço, (Figura 9B), e três diferentes tipos de açúcares (Figura 9C) (Demerara AC3 Confeiteiro AC2 e Cristal AC1 respectivamente), devido às diferentes granulometrias que apresentam. Todos os produtos foram adquiridos no comércio local.

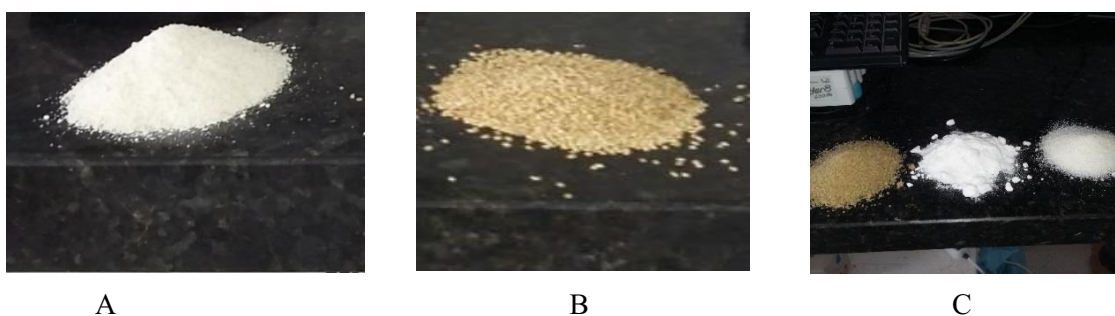


Figura 9 - Produtos utilizados

### 4.4 – Silo em modelo reduzido

Utilizou-se um modelo reduzido de silo cilíndrico, confeccionado pela Doutora Cláudia Batista em 2009 para sua tese de doutorado. O silo foi confeccionado em acrílico, Figura 11, para melhor visualização dos fenômenos que ocorrem com o produto durante a descarga, tem paredes de espessura 1,5 mm, altura de 1 m e diâmetro interno de 0,145 m, representando um silo com relação H/D de 6,9 m. Em sua base foram conectadas tremonhas (seção cônica confeccionada em aço zincado), com um orifício de descarga de 35mm, 50mm para as tremonhas de 30 e, 45° respectivamente, e de 85mm e 30mm para a tremonha com ângulo de inclinação de, 60° com relação a horizontal, conforme pode ser observado na Figura 10.

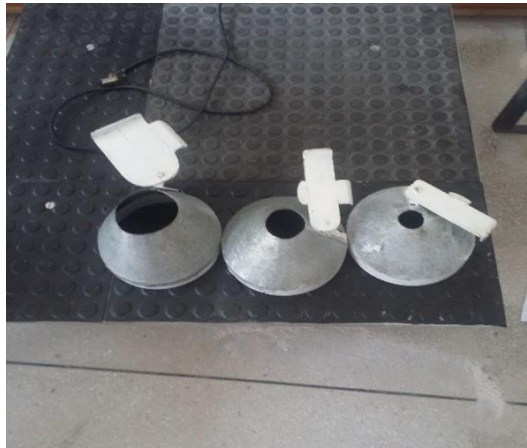


Figura 10 - Tremônhas utilizadas

O silo, com parede de acrílico,( Figura 11), é sustentado por uma estrutura de aço, a qual está sobre a balança digital que registrava uma variação de massa, durante a descarga dos produtos, estando a mesma conectada ao sistema de aquisição de dados Modelo Spider8600Hz de fabricação da HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik) , permitindo obter assim a variação da massa de sólido no interior do silo ao longo do tempo.



Figura 11- Silo em modelo reduzido utilizado

#### 4.5– Obtenção dos dados

O silo foi inicialmente colocado sobre a balança, para em seguida ligar o sistema de aquisição de dados. Fora desenvolvido um sistema de carregamento central para garantir a repetibilidade

dos testes frequência de aquisição foi de 2 Hz.

Após o enchimento do silo esperou-se 10 minutos para a acomodação da massa de produto, para em seguida dar início ao descarregamento. Para melhor uniformização o açúcar confeiteiro precisou ser peneirado antes de fazer os testes.

#### 4.5- Propriedades de fluxo

As propriedades de fluxo determinadas foram: peso específico, em função da consolidação ( $\gamma$ ), ângulo de atrito interno ( $\phi$ ), efetivo ângulo de atrito interno ( $\delta$ ), coesão (C), ângulo de atrito com o produto ( $\phi_w$ ); Para determinação das propriedades de fluxo adotou-se a metodologia recomendada pela (British materials handling board – BMHB,(1985), para aquisição dos dados, utilizou-se a célula de cisalhamento direto por translação (TSG 70-140), conhecida internacionalmente como “Jenike Shear Cell” (Figura 12).



Figura 12- Célula de cisalhamento direto por translação (TSG 70-140)

Com os dados oriundos dos testes no aparelho de cisalhamento de Jenike pode-se construir gráficos de tensão normal versus cisalhamento.( Figura 13) que possibilita traçar semicírculos de tensões de Mohr responsáveis por determinar a Tensão principal de consolidação ( $\sigma_m$ ) e a Tensão inconfineda ( $f_c$ ).

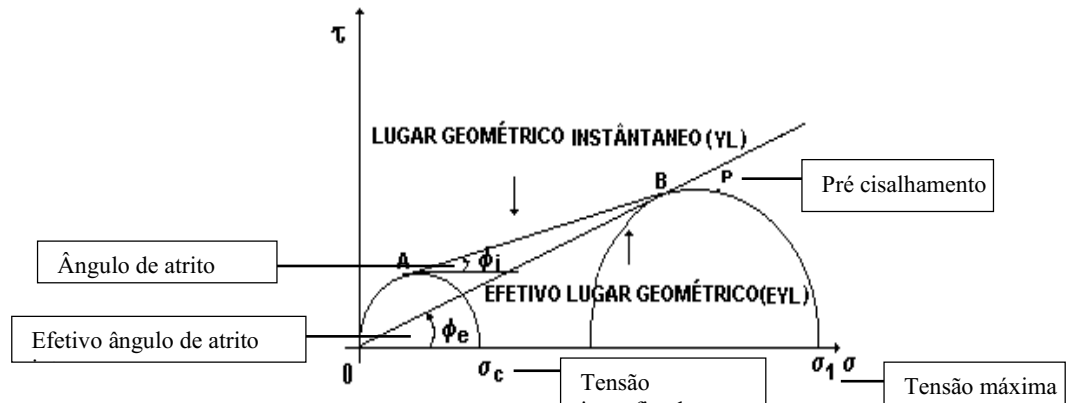


Figura 13 - Lugar geométrico (YL e EYL), ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito tensão inconfiada e tensão máxima  
 Fonte: Adaptado de (Meira,2015)

A partir dos resultados obtidos com os ensaios no aparelho de cisalhamento de Jenike, utilizou-se o programa gráfico AutoCAD, para traçar os gráficos de tensão normal versus tensão de cisalhamento (semicírculo de Mohr) e com este determinou-se as seguintes propriedades de fluxo: ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ); efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ), ângulo de atrito do produto com a parede ( $\phi_w$ ).

Ainda com o auxílio da ( Figura 13), foi possível determinar a Coesão (C) dos produtos utilizados para os diferentes níveis de carga adotados.

Os níveis de cargas normais adotados neste trabalho estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 5 - - Cargas do pré-shear e shea

<b>Carga para Pré Shear (N)</b>	<b>Cargas Shear (N)</b>	<b>Carga Atrito com a Parede (N)</b>
<b>70</b>	50 - 35 - 20	
<b>50</b>	35 - 20 - 10	
<b>35</b>	20 - 10 - 07	50; 40; 30; 20; 10; 4,4
<b>25</b>	10 - 07 - 05	

Para a determinação do menor ângulo de inclinação da tremonha com a horizontal ( $\theta_m$ ), adotou-se seguintes equações de (Enstad ,1981):

$$\theta_m = 0,5 * \cos^{-1}(\sin \phi_{iu} / \sin \phi_{iu}) + \beta \quad \text{Eq.17}$$

$$\beta = (\phi_w + \sin^{-1}(\sin \phi_w / \sin \phi_{iu}))/2 \quad \text{Eq.18}$$

Para o cálculo do ângulo de atrito com a parede ( $\Phi$ ), é necessário substituir a base da célula de cisalhamento pelo mesmo material que é feita a parede do silo. A partir dessa nova configuração são medidas as tensões de cisalhamento ( $\tau$ ) que são necessárias para mover a célula para vários valores de tensões normais ( $\sigma$ ). Os pares de tensões ( $\sigma, \tau$ ) são então plotados em um gráfico e o ângulo é a inclinação da reta, essa reta representa o lugar geométrico do deslizamento.

$$\phi_w = \arctan \frac{\tau_w}{\sigma_w} \quad \text{Eq.30}$$

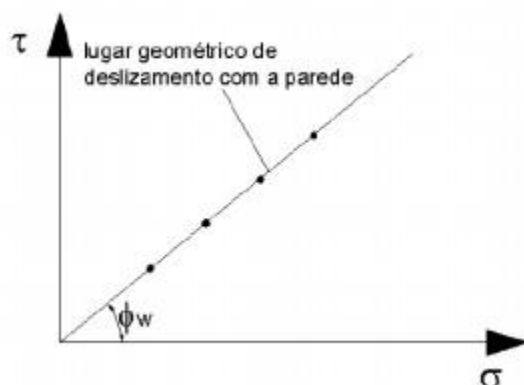


Figura 14 - Gráfico  $\sigma \times \tau$

Com relação à dimensão mínima do diâmetro do orifício de descarga para silos com fluxo de massa, utilizou-se a equação de Jenike (1964):

$$D = \frac{H(\theta)\sigma_{cr}}{\gamma} \quad \text{Eq. 19}$$

D – Diâmetro mínimo do orifício de saída (m)

H ( $\theta$ ) - Constante igual a 2,3, adimensional

$\sigma_{cr}$  - Tensão Crítica não confinada,

(Pa)  $\gamma$  - Peso Específico consolidada,

(N m<sup>-3</sup>)

Os orifícios de descarga e as inclinações usadas nessa pesquisa foram de acordo com tremonhas já existentes no laboratório Tabela 7, e comparados com os valores obtidos através da equação de Jenike (1964)

Tabela 6- Produtos utilizados com diâmetros de descarga e inclinações

PRODUTO	D(m)	I(°)
F. de mandioca	0,035 e 0,050	30 e 45
Painço	0,035 e 0,050	30 e 45
AC1	0,035 0,050 0,085	30 45 60
AC2	0,085 e 0,030	60
AC3	0,050 e 0,030	45 60

#### 4.6 Determinação das propriedades físicas dos produtos

##### 4.6.1 - Teor de umidade

A determinação da umidade da farinha de mandioca foi efetuada em triplicata, utilizando-se 10 g do produto, usando-se estufa a 105 °C, por 8 horas. A determinação da umidade do painço assemelha-se a da farinha de mandioca diferenciando – se no tempo de exposição a estufa, 105 ± 3 ° C, por 24 h. Os açúcares foram submetidos a temperatura de 105 ± 3 ° C, por 3 h Normalizado pelo Centro de tecnologia canavieira (CTC) em 2013. Em seguida, os recipientes foram resfriados em dessecador, novamente pesados obtendo-se a massa seca. As umidades foram calculadas usando-se a Equação 20

$$U = \frac{m_{agua}}{m_{total}} \times 100$$

Eq. 20

onde: U – umidade ( % base úmida);

$m_{\text{água}}$  – massa de água da amostra (g);

$m_{\text{total}}$  – massa total da amostra (g).

#### 4.– Granulometria

Para a determinação granulométrica, utilizou-se um conjunto de peneiras padrão ABNT/ASTM as quais foram montadas em ordem decrescente, em função da malha, e agitadas em um vibrador elétrico por um período de 5 minutos com 150 g do produto. Após esse processo, as peneiras foram retiradas e pesadas em balança eletrônica de precisão de 0,01g. Pela diferença de massa em cada peneira, determinaram-se as frações granulométricas dos produtos.

#### 4.6 Modelos teóricos para análise de vazão

Para comparação dos dados experimentais, serão utilizados os seguintes modelos teóricos:, pois são os mais confiáveis e usuais.

##### 4.6.1 Metodologia de Beverloo et al. (1961)

A metodologia de Beverloo *et al.* (1961) prevê o cálculo da vazão de descarregamento através da Equação 21 a seguir:

$$Q = C_y \sqrt{g} (D - K_s d_p)^{1/2}$$

Eq. 21

Sendo:

Q = vazão mássica ( $\text{m}^3/\text{h}$ );

C = constante;

$\gamma$  = peso específico consolidado ( $\text{N}/\text{m}^3$ );

g = aceleração da gravidade ( $9,8 \text{ m}/\text{s}^2$ );

D = diâmetro do orifício de descarga

(m);  $k_s$  = constante;

$d_p$  = diâmetro médio das partículas (m);



#### 4.6.2 Metodologia de Rotter (2001)

A metodologia de Rotter (2001) adotada para comparação aos valores experimentais é aplicada a silos com tremonhas com saídas circulares e consiste da Equação 22, a seguir:

$$Q = 0,6\gamma_{inf}G_f \frac{(D - K_s d_p)^{2,5}}{\sqrt{g}} \quad \text{Eq. 22}$$

donde:

$Q$  = vazão mássica ( $m^3/h$ );

$\gamma_{inf}$  = valor inferior do peso específico ( $kg/m^3$ );

$D$  = diâmetro do orifício de descarga (m);

$k_s$  = constante de forma da partícula podendo ser adotado 1,6 para partículas próximas ao formato esférico e 2,4 para partículas muito angulares;

$d_p$  = diâmetro médio das partículas (m);

$g$  = aceleração da gravidade ( $9,8 m/s^2$ );

$G_f$  = fator que depende se o fluxo no orifício de descarga está em contato localmente com a tremonha podendo ser calculado pela comparação do ângulo interno da tremonha  $\alpha$  com a inclinação do canal de fluxo  $\alpha_0$ .

Quando o fluxo for interno ( $\alpha < \alpha_0$ ), o fator  $G_f$  será 1,0; quando o fluxo estiver em contato com a tremonha ( $\alpha > \alpha_0$ ), o fator  $G_f$  poderá ser calculado pela Equação 23 , a seguir:

$$G_f = 0,75 \frac{(1 - 0,08 \cos \alpha)}{\sqrt{\sin \alpha}} \quad \text{Eq.23}$$

Sendo  $\alpha$  a inclinação da tremonha com o eixo vertical. O ângulo natural do canal de fluxo com a vertical pode ser estimado para um silo esbelto como  $\alpha_0 = 90^\circ - \phi_e$ , sendo  $\phi_e$  o efetivo ângulo de atrito interno

## 5.RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Propriedades físicas dos produtos

Os valores das umidades dos produtos utilizados encontram-se na Tabela 7, segundo Anvisa (Agência Nacional de Vigilância Sanitária) a umidade da farinha de mandioca não deve ultrapassar 14%, o painço 12%. Segundo o Inmetro e a Anvisa a umidade do açúcar cristal deve ser menor que 0,04% o açúcar confeiteiro menor que 0,3% e o açúcar demerara menor que 0,3%. Os produtos utilizados na pesquisa estavam dentro das faixas normatizadas, com exceção, do açúcar confeiteiro e demerara, possivelmente a diferenciação das umidades dos mesmos dá-se por ser um produto altamente higroscópico.

Tabela 7 - Produtos e suas umidades

Produto	U1 (%)	U2 (%)
Farinha de mandioca	4,92	4,98
Painço	12	12
Açúcar cristal (AC1)	0,22	0,26
Açúcar confeiteiro (AC2)	0,60	1,1
Açúcar demerara (AC3)	0,20	0,32

U1 = umidade no início dos ensaios; U2 = umidade no final dos ensaios.

#### 5.1.1 Granulometria

Na Figura 16 encontram-se as curvas granulométricas dos produtos granular e pulverulentos podendo-se destacar a similaridade em distribuição granulométrica para os produtos açúcar cristal e demerara ambos com maior parte dos seus cristais retidos na peneira 0,297mm; já o açúcar confeiteiro tem seu maior percentual retido na peneira 0,149mm tal como a farinha de mandioca , o painço tem seu maior percentual retido na peneira 2 mm.

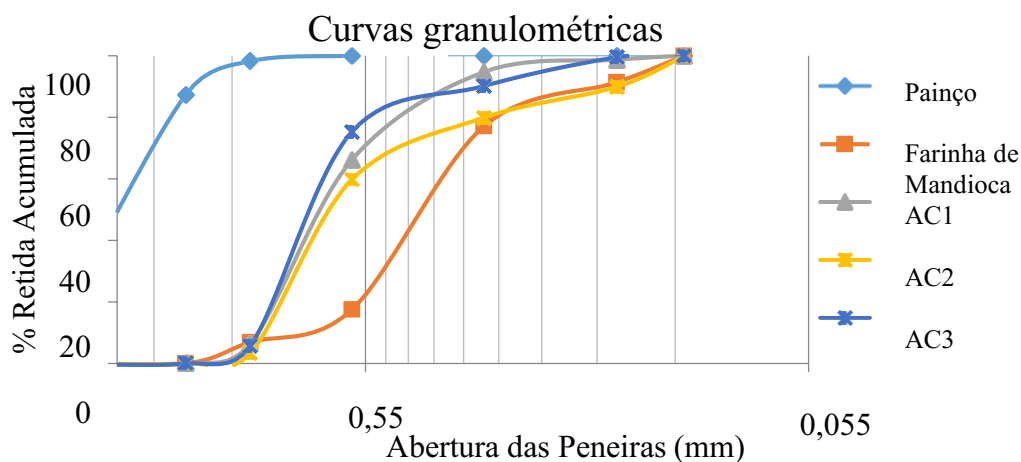


Figura 16 - Curva granulométrica dos produtos utilizados.

Conforme a classificação de fluidez de Jenike (1964), os produtos: açúcar cristal, demerara e farinha de mandioca são pulverulentos coesivos, o açúcar confeiteiro classifica-se como pulverulento coesivo fino, e o painço é um produto granular.

## 5.2 Propriedades de fluxo

Na Tabela 8 encontram-se os resultados das propriedades de fluxo dos produtos (farinha de mandioca, painço, e os açúcares AC1, AC2 e AC3).

Tabela 8 - Propriedades de fluxo dos produtos granulares

Produtos	$\gamma$		$\phi$		$\delta$		C	ff
	inf	sup	inf	sup	inf	sup		
FARINHA DE MANDIOCA	7,0	7,07	17	28	20	28	480	2,11
PAINÇO	6,07	6,36	10	20	14	16	120	4,44
AC1	9,79	9,99	21	34	32	35	846	1,71
AC2	8,61	9,44	11	32	28	53	2140	1,60
AC3	9,02	9,35	32	34	32	35	307	1,66

$\gamma$  = peso específico consolidado (KN.m<sup>-3</sup>);  $\phi$  = ângulo de atrito interno (°);  $\delta$  = efetivo ângulo de atrito interno (°); C = coesão (Pa); ff = fator fluxo

atrito interno ( $\delta$ ), são apresentadas em seus valores máximos e mínimos pois tendo como referência a norma australiana AS 3774 (1996); Nascimento (1996); Araújo (1997); Calil Júnior (1998); Nascimento (1998) e Silva (1998) e Freitas (2001), tendo em vista que as propriedades dos produtos armazenados em silos variam durante a vida útil do silo e considerando o critério de dimensionamento dos estados limites, Calil Jr (1997) propõe, de acordo com a norma australiana AS (1996), que, em termos de projeto, deverão ser determinados dois limites para cada parâmetro, de modo a delimitar a sua faixa de variação e, com isso, obter-se as combinações mais desfavoráveis para cada caso. Estes limites são o menor valor possível (limite inferior) e o maior valor possível (limite superior) para o parâmetro considerado durante a vida útil do silo. As propriedades peso específico ( $\gamma$ ), ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) e ângulo efetivo de

Importante salientar que dos produtos trabalhados apenas o açúcar é regulamentado por normas estrangeiras existentes, e assim mesmo não é açúcar oriundo da cana de açúcar os demais produtos foram comparados com trabalhos realizados na área.

### **5.2.1 Peso específico consolidado ( $\gamma$ )**

Observa-se o peso específico, da Tabela 8 dos produtos estudados, para farinha de mandioca os são, próximos aos relatados por Costa (2014) que foi entre 7,1 e 7,4 KN/m<sup>3</sup> inferior e superior respectivamente.

Os estudos com painço demonstraram valores próximo da faixa encontrada por Palma (2005) que foi entre 6,1 e 6,2 KN/m, mesmo o tempo de armazenamento e umidades que os grãos foram submetidos sejam diferentes.

O peso específico dos açúcares ficaram, próximo da faixa recomendada pela norma AS 3774 (1996) que estabelece valores entre 8 e 10 KN/m<sup>3</sup>, mesmo não fazendo menção ao tipo de açúcar.

Conforme Calil Junior (1989), não existe relação direta entre a razão peso e volume de uma amostra do produto com a predição do fluxo; entretanto, esta variável precisa ser calculada pois é um parâmetro importante para determinação das pressões em silos.

### **5.2.2 Ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) e Efetivo ângulo de atrito interno ( $\delta$ )**

Com relação ao ângulo de atrito interno, ainda na Tabela 8, e gráficos dos círculos de Mohr que encontram-se no apêndice, a farinha de mandioca ficou com valores inferior e superior, menores do que os encontrados por (Costa ,2014) que foram 27 ° e 36°.

O efetivo ângulo de atrito interno também apresentou valores diferentes dos obtidos por Costa (2014) que foram 32 e 50 inferior e superior respectivamente, o que pode ser explicado pela faixa de umidade que Costa (2014) trabalhou: 10, 12 e 14%. Nesta pesquisa a umidade não passou de 5%.

As diferenças nos valores podem ser explicadas pelo gradiente, teor de umidade que foram realizados os ensaios. Costa ( 2014) trabalhou com umidades da farinha de 10 e 12%, já a umidade que foi realizada essa pesquisa não passou de 5%, Costa (2014) também trabalhou com tempo de armazenamento diferente, .

O painço obteve valores de ângulo de atrito interno inferior e superior respectivamente, diferentes dos encontrados por Palma (2005) 23° e 25°, os valores do efetivo ângulo de atrito

interno foram também diferentes dos valores encontrados por Palma (2005): 23° e 25°.

O açúcar AC1, AC2 e AC3 apresentaram ângulo de atrito interno inferior e superior diferente das normas (DIN 1055,1987) e (AS 3774,1996), visto que as mesmas não especificam o tipo de açúcar estudado.

Gomes (2001) explica que o ângulo de atrito interno está diretamente ligado às condições internas do produto. O aumento das pressões de confinamento irá tornar a massa mais densa com menos índices de vazios aumentando assim, o ângulo de atrito interno.

Gayolord & Gayolord (1984) mostram que para um exemplo de  $\phi_e = 50^\circ$  e  $\phi_w = 25^\circ$  a pressão horizontal de fluxo, em silo com fluxo de massa, imediatamente abaixo da transição é 6,7 vezes a pressão inicial imediatamente acima. Contudo, se  $\phi_e = 25^\circ$  e as outras variáveis permanecem as mesmas, a taxa da pressão de pico pela pressão inicial cai para 2,83 conforme Walters (1966) e para 2,58 conforme Jenike & Johanson (1973). Portanto, os picos de pressão parecem ser muito sensíveis ao efetivo ângulo de atrito interno.

O efetivo ângulo de atrito interno do açúcar AC1 apresentou valores de (32° e 35°) inferior e superior respectivamente para o açúcar AC2 (28° e 53°), e de (32° e 35°) para o açúcar AC3.

### **5.2.3 Coesão (C)**

De acordo com a Tabela 8 os produtos que apresentaram maior coesão foram açúcar confeiteiro (AC2) seguido do açúcar cristal (AC1) e açúcar demerara (AC3), observa-se que o produto com maior coesão como o AC2, foi o que apresentou maior problema de fluxo, com isso o surgimento do fenômeno Slip- stick, que dificultou bastante o fluxo.

### **5.2.4. Ângulo de atrito com a parede ( $\phi_w$ )**

De acordo com a tabela 9 o produto que obteve maior ângulo de atrito com a parede foi o (AC2- açúcar confeiteiro) seguido do (AC3 – açúcar demerara) tanto na parede de acrílico como na parede de aço zincado.

Tabela 9 - Ângulo de atrito com a parede de acrílico e aço zincado

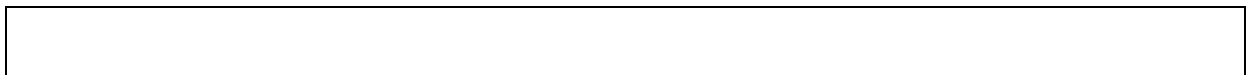
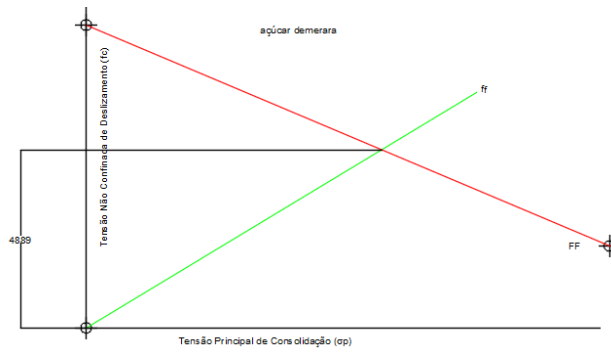
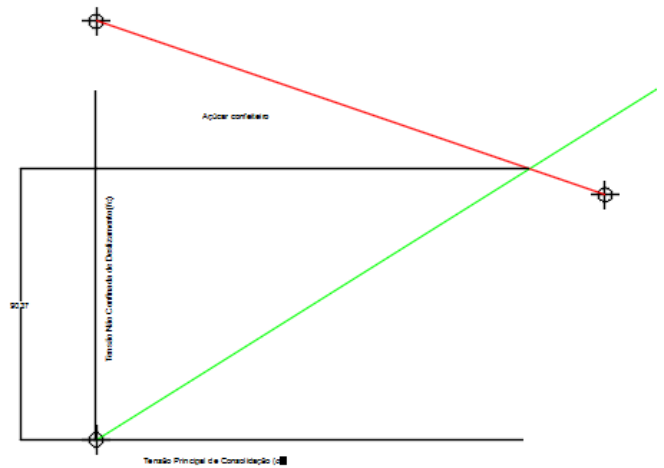
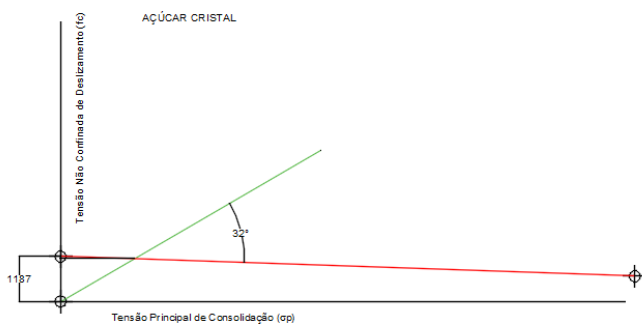
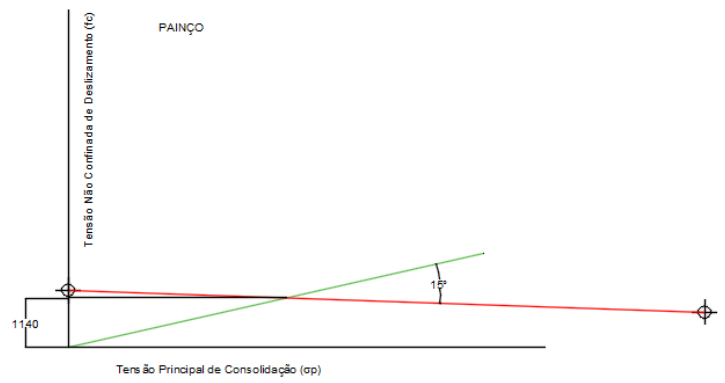
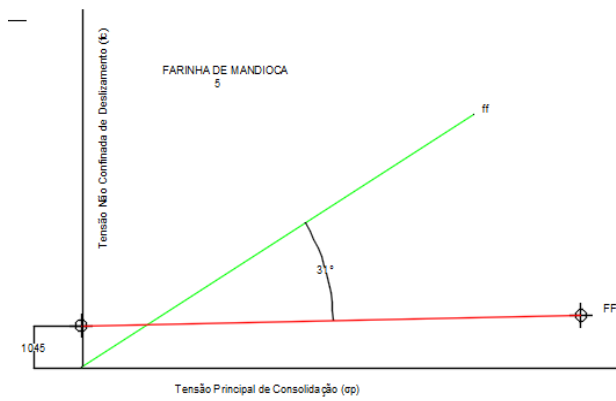
PRODUTO	Acrílico		Aço zincado	
	inf	sup	inf	sup
FARINHA DE MANDIOCA PAINÇO	10	12,7	16,4	18,7
AC1	14,8	16,7	18,1	21,9
AC2	17,6	25,7	19,01	27,11
AC3	15	19,3	18,3	22,9

Em seu trabalho com café com pergaminho com vários teores de umidade, (Silva *et al*).2011, afirmam que o aumento nas propriedades de atrito em função do teor de água se deve, possivelmente, ao fato de que os produtos com maior teor de umidade geram maiores forças de adesão e coesão entre os grãos e também entre esses e a superfície de contato.

Observando-se a Tabela 10, a Tabela 9 e a Tabela 8, pode-se notar que os maiores valores de ângulos de atrito com a parede são dos açúcares AC2 e AC3 e AC1 respectivamente, sugerindo que, esses valores, devem-se a suas coesões e suas umidades, pois dentre os açúcares os que apresentaram maior coesão, apresentaram também maior umidade e por conseguinte maior ângulo de atrito produto parede.

### 5.2.5 Função Fluxo (FF)

A determinação da função fluxo do produto (FF) foi realizada através da construção de gráfico no qual é plotado a Tensão Não Confinada de Deslizamento versus Tensão Principal de Consolidação a qual representa o esforço atuante no produto quando em situação de consolidação que, encontra-se no Apêndice,



com isso balizando-se na classificação de ( Jenike), 1964 na Tabela 3, pode-se classificar a fluidez dos produtos estudados como demonstra a Tabela 10.

Tabela 10- Classificação dos produtos quanto a fluidez

PRODUTO	FF	Análise da Fluidez
Farinha de mandioca	8,7	Produto que flui facilmente
Painço	8,3	Produto que flui facilmente
AC1	4,1	Produto que flui facilmente
AC2	2,9	Produto coesivo
AC3	10,4	Produto que flui facilmente

O produto pulverulento que apresenta maior coesão é o açúcar confeiteiro (AC2) indicativo para sua fluidez ser classificada como coesiva segundo Jenike (1964), entretanto o (AC1) e o (AC3) que apresentaram coesão são classificados como produto que flui facilmente ou seja sem coesão, o que pode ser explicada pela umidade do produto na realização dos ensaios.

No dimensionamento do orifício de descarga (D), obtido pelas equações de Jenike, usou-se um valor de Tensão Crítica ( $\sigma_{cr}$ ) obtido através da intersecção das curvas de ff e FF ,que encontra-se no apêndice ,para cada produto, Tabela 12 e a equação 31 desenvolvida por Jenike (1964), no cálculo da inclinação utilizou-se as equações 28 e 29.

Tabela 11 - Diâmetro mínimo do orifício de descarga e inclinação (Jenike)

PRODUTO	$\sigma_c$ (Pa)	H( $\theta$ )	$\gamma$ ( N/m <sup>3</sup> )	D(m)	I(°)
Farinha de mandioca	1045	2.3	7070	0.34	46
Painço	1140	2.3	7360	0.035	30
AC1	1187	2.3	9990	0.27	56



AC2	9037	2.3	9440	2.20	64
AC3	4889	2.3	9350	1.20	50

I(°) Inclinação da tremonha

Observando-se os valores de diâmetro de orifício de descarga e inclinação da tremonha na Tabela 7, que são oriundos de tremonhas já existentes no laboratório, e comparando os valores com os expostos na Tabela 12, que são os calculados através das equações de Jenike (1964), pode –se observar maior diferença entre os valores dos diâmetros dos orifícios de descarga dos produtos AC2 ( açúcar confeito ) e AC3 ( açúcar demerara) podendo assim explicar os problemas que ocorreram no descarregamento de ambos.

### 5.3 Características de fluxo

Apresenta-se na Figura 17 a sequência de imagens de descarregamento do painço no silo com tremonha de inclinação de 30° com a horizontal e relação H/D de 6,9 m. O tempo de armazenagem foi de aproximadamente 10 minutos. Durante todo descarregamento ocorreu fluxo de massa, o mesmo constatou-se para inclinação de 45° Figura 18.

O Produto painço apresenta fluxo livre ou seja alta capacidade de entrar em movimento assim que haja a abertura do orifício de descarga, o descarregamento do mesmo, com a tremonha de inclinação de 45° durou cerca de 45 segundos, com a inclinação de 30° durou 60 segundos. De acordo com o modelo teórico de Jenike (1964) Tabela 11 a inclinação ideal seria de 30° com orifício de descarga de 0,035 m, porem o fluxo com a tremonha de 45° ocorreu 15 segundos mais rápido que a tremonha com inclinação de 30° porem com orifício de descarga maior 0,050m.

O fluxo de massa apresenta vantagens em relação ao fluxo de funil, principalmente quando se deseja evitar flutuações na vazão de descarga .

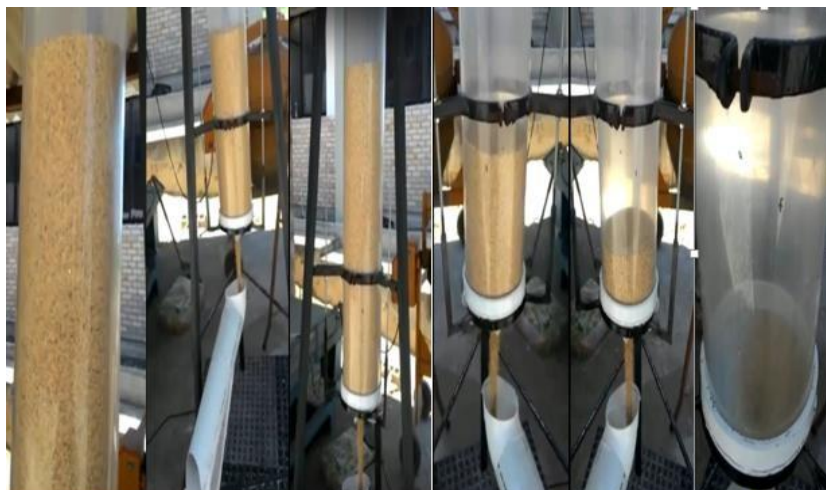


Figura 17- Sequência de imagens para o painço 30°



Figura 18- Sequência de imagens para o painço 45°

Na Figura 19 visualiza-se a sequência de imagens para o descarregamento da farinha de mandioca para tremonha com inclinação de 30° com a horizontal. O tipo de fluxo observado foi o fluxo de funil com formação de canal de fluxo como observado na Figura 20

Antes do início do descarregamento, a massa armazenada encontrava-se confinada e sujeita a um estado passivo de tensões e a esta tensão dá-se o nome de tensão de consolidação ( $\sigma_M$ ). Com a abertura do orifício de descarga as tensões passaram a atuar em uma única direção e estabeleceu-se um estado ativo de tensões. A esta tensão dá-se o nome de tensão não confinada de deslizamento ( $f_c$ ) Jenike, (1964) e Schulze, (2008).

A mudança do estado de tensão passivo para o ativo provocou um efeito de cisalhamento no produto resultando no deslizamento de parte de sua massa e, por conseguinte, a ocorrência de fluxo.



Figura 19 - Sequência de imagens para a farinha de mandioca 30°

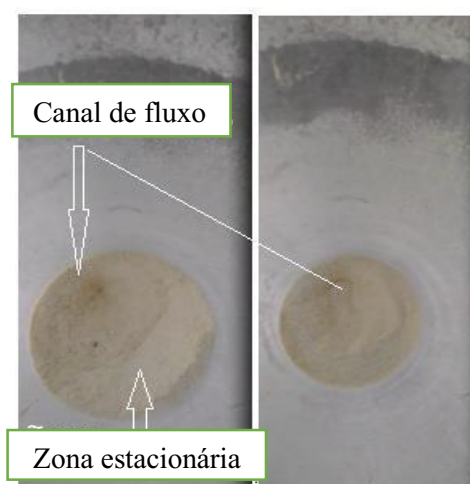


Figura 20 - Vista superior do descarregamento da farinha de mandioca 30°

Na Figura 21 observa-se o fluxo da farinha de mandioca, o fluxo também foi tipo funil mas com o total descarregamento do produto, diferente do ocorrido com a tremonha com inclinação de 30°.



Figura 21- Vista superior do descarregamento da farinha de mandioca 45°

Na Figura 22 pode-se observar o descarregamento do açúcar cristal com tremonhas de diferentes inclinações 30° e 45° respectivamente.

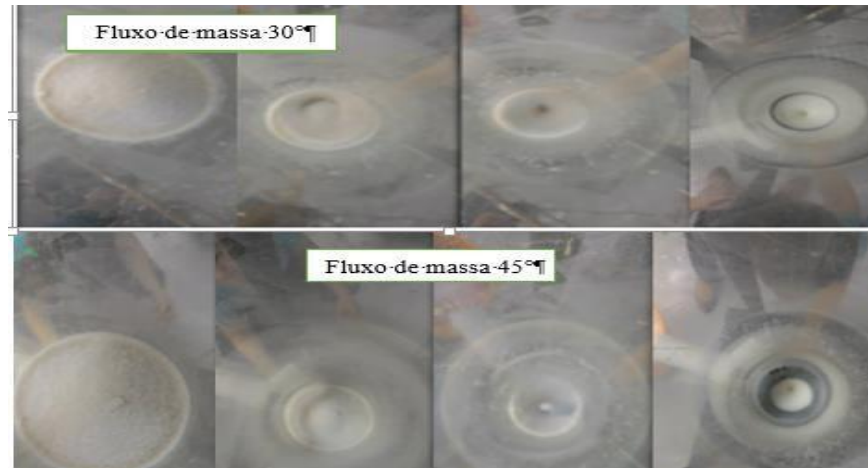


Figura 22 - Vista superior do descarregamento do açúcar cristal 30° e 45°

O tipo de fluxo observado do início ao fim do descarregamento foi fluxo de massa, não havendo mudança de fluxo mesmo as inclinações e orifícios de descarga sendo diferentes.

Em seu trabalho Medeiros (2012) explica que o fluxo em massa só é possível quando se descarrega um produto granular de baixa coesão e baixo atrito interno, o açúcar cristal comportou-se de uma forma diferente nessa pesquisa, pois apresenta baixa coesão, porém alto atrito interno Tabelas 8 e 9 respectivamente

Nas Figuras 23, pode-se observar o descarregamento do açúcar confeiteiro com inclinação de 60° e orifício de descarga de 0,085m já na Figura 24 o descarregamento acontece com a mesma inclinação mas, orifício de descarga de 0,030m .

Ainda na Figura 23 fica evidente o fluxo do tipo funil com descarga excêntrica cuja característica é a formação de um canal de fluxo, formado por uma zona na qual o produto permanece estagnado.



Figura 23 - Sequência de imagens para o açúcar confeiteiro com orifício de 0,085m

Na Figura 24, com orifício de descarga 0,030m observa-se a formação de uma descontinuidade devido à má formação do canal de fluxo e a alta coesão do produto, dando a impressão de “bolsões de ar”, esses bolsões podem ser explicados pela alta coesão do produto e tamanho das partículas muito pequenas, como o produto não flui as partículas se agregam formando partículas maiores.

Os cálculos segundo o método de Jenike, sugerem uma inclinação de  $64^\circ$  mas com um orifício de descarga de 2,20cm para haver fluxo



Figura 24 - Sequência de imagens para o açúcar confeiteiro com orifício de 0,030m



Na Figura 25 observa-se o açúcar demerara com tremonha de 45° onde não houve fluxo por gravidade mesmo sendo classificado como produto de fluxo fácil, provavelmente devido ao seu teor de umidade, inclinação da tremonha e diâmetro de descarga que pelo método de Jenike deveria ser 50° de inclinação e 1,20cm de diâmetro de descarga. O fluxo aconteceu após interferência manual, este movimento culminou na desagregação de uma zona de produto que, imediatamente entrou em movimento descendente.



Figura 25 - Interferência manual

Na figura 26 observa-se o fluxo do açúcar demerara com a tremonha de 60°, o fluxo é do tipo massa, ocorre sem interrupções havendo a formação de um canal de fluxo

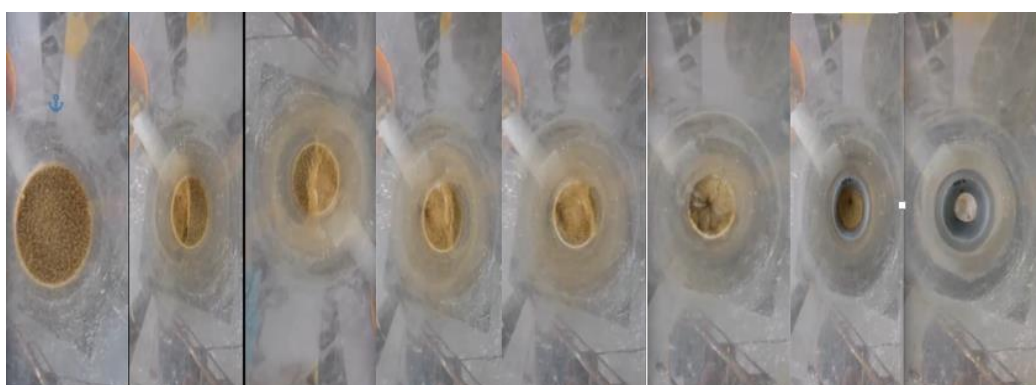


Figura 26 - Sequência de imagens para o açúcar demerara com tremonha de 60°

#### **5.4 Comparativo entre os valores teóricos e experimentais de vazão**

A Figura 27 representa os valores experimentais e teóricos para a farinha de mandioca utilizando-se tremonhas com inclinação de 30 e 45°. Ficou patente que o valor experimental de vazão com inclinação de 30° foi maior que ao proposto pela equação de (Beverloo et al, 1961)

e (Rotter,2001), a inclinação de 45 apresentou valor menor que o experimental na equação de (Beverloo et al) e praticamente iguais na equação de (Rotter, 2001). Tendo a tremonha com inclinação de 45° a maior vazão.

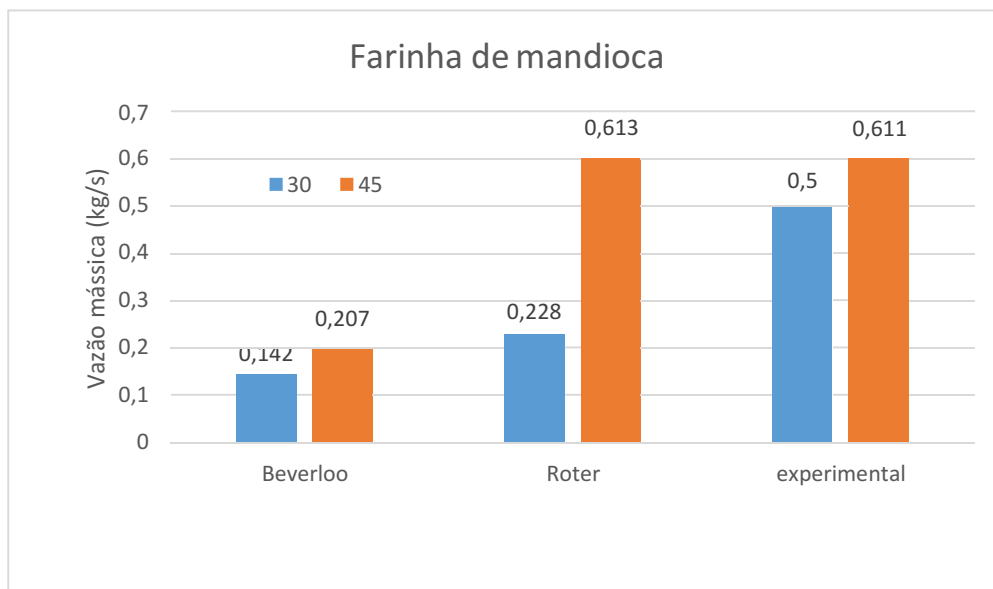


Figura 27- - Comparativo das vazões para farinha de mandioca

A Figura 28 representa os valores experimentais e teóricos para o produto painço utilizando-se tremonhas com inclinação de 30 e 45°; observou-se que os valores experimentais para a inclinação de 30°, foram maiores que os obtidos através da equação proposta por (Beverloo, 1961), já quando comparado o valor experimental para a inclinação de 45° com (Beverloo, 1961) e (Rotter, 2001) os valores são próximos. Sendo a inclinação de 45° a que obteve maior vazão.

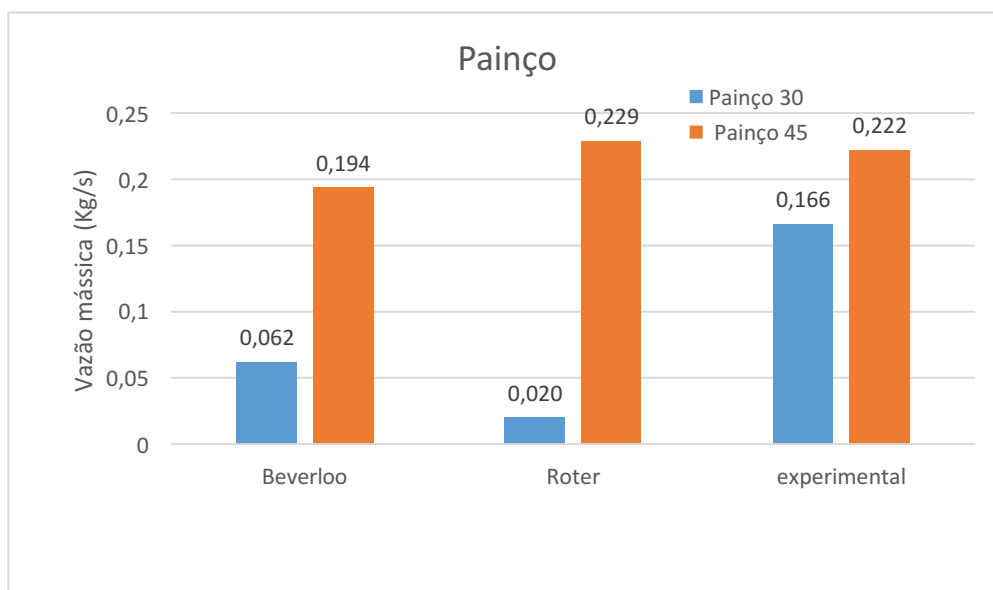


Figura 28- Comparativo das vazões para painço

A Figura 29 representa os valores experimentais e teóricos para o produto açúcar cristal utilizando-se tremonhas com inclinação de 30, 45 e 60°; observou-se que os valores experimentais foram maiores que o proposto por (Beverloo, 1961) e menores que os propostos por (Rotter, 2001). Sendo a inclinação de 45° a que obteve maior vazão experimental.

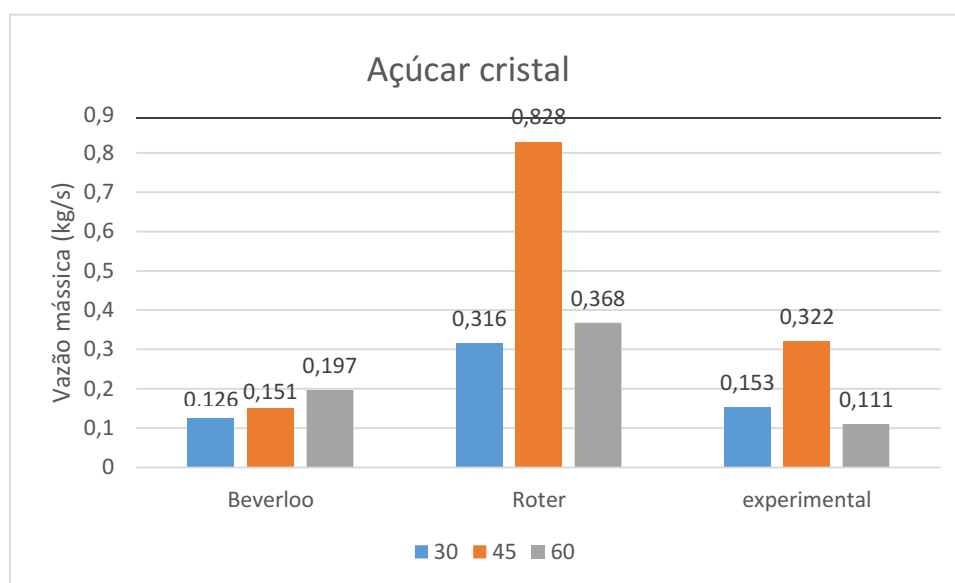


Figura 29- Comparativo das vazões para açúcar cristal

A Figura 30 representa os valores experimentais e teóricos para o produto açúcar confeiteiro utilizando-se tremonha com inclinação de 60° e dois orifícios de descarga diferentes 0,085 e 0,030m. Não houve fluxo significativo com a tremonha com orifício de descarga 0,030 m tanto com a equação de (Beverloo,1961) quanto na de (Rotter,2001) e nem experimentalmente; as vazões com orifício de 0,085m foram maiores nas equações teóricas em comparação com o fluxo experimental , que por sua vez, apresenta valores muito baixos de vazão .



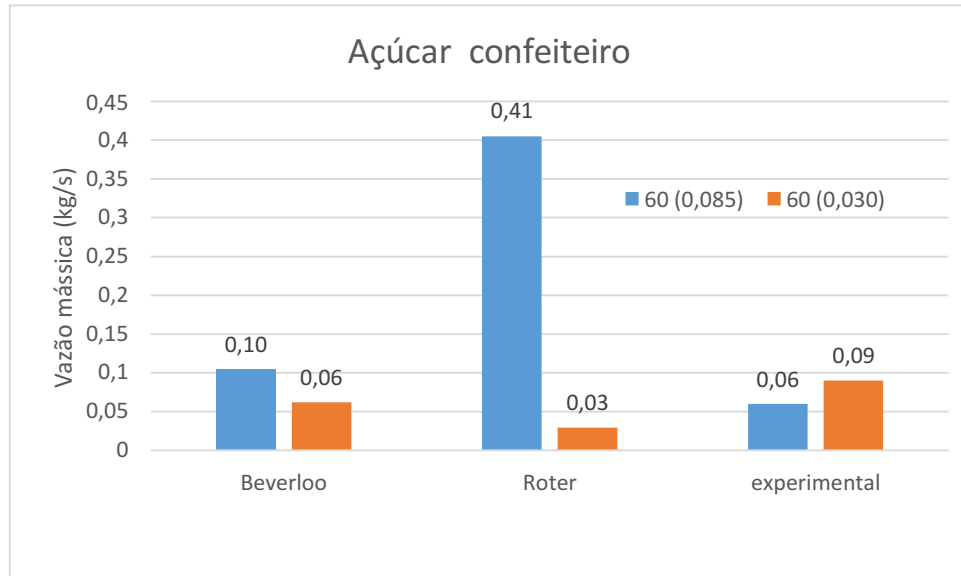


Figura 30- Comparativo entre valores experimentais e teóricos

A Figura 31 representa os valores experimentais e teóricos para o produto açúcar demerara utilizando-se tremonhas com inclinação de 45 e 60°. Com a tremonha com inclinação de 45° não houve fluxo experimentalmente. A tremonha com inclinação de 60°obteve valores diferentes entre (Beverloo,1961) e ( Rotter,2001) e o experimental.

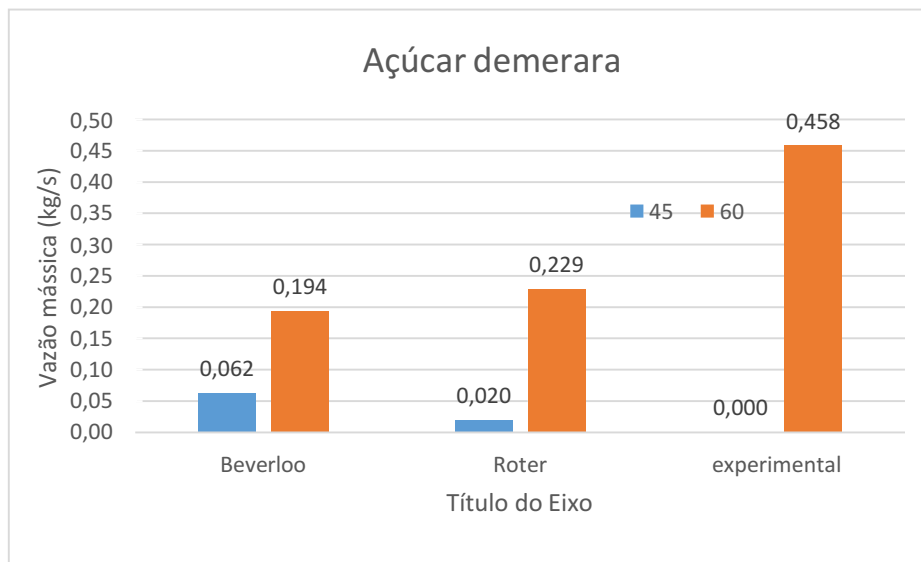


Figura 31 - Comparativo entre valores experimentais e teóricos

### 5.5 Vazão de descarga

A Figura 32 representa o descarregamento do painço com duas diferentes inclinações da tremonha. O maior valor de vazão mássica instantânea ocorreu com a inclinação de 45° sendo em média 0,222kg/s que representa 33% mais rápida que a inclinação de 30° que foi em

média 0,166kg/s;. A maior vazão mássica instantânea da tremonha com inclinação de 45° aconteceu devido a maior inclinação do limite do canal de fluxo, conferindo ao produto maior velocidade em direção ao orifício de descarga.

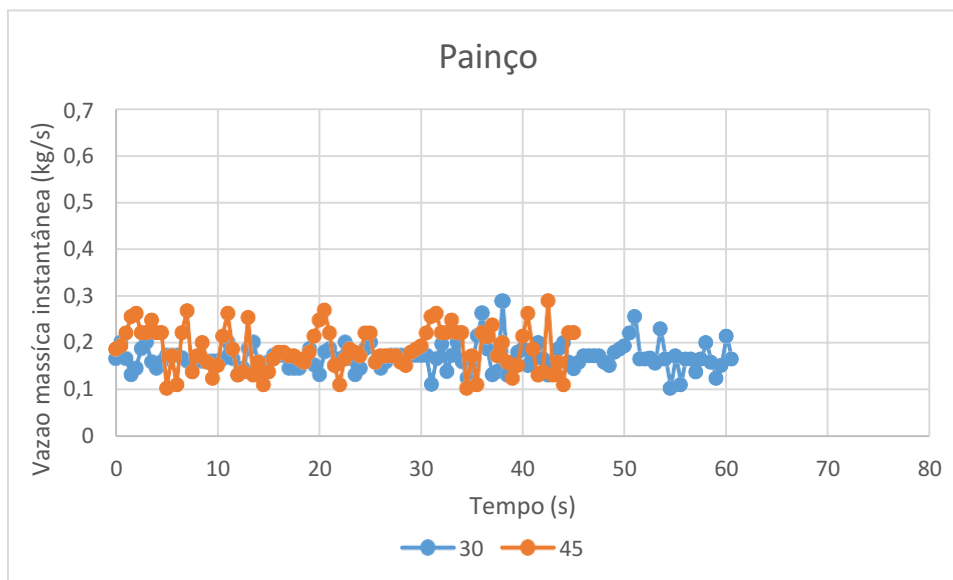


Figura 32 - Curvas de vazão para o descarregamento do painço

A Figura 33 representa o descarregamento para a farinha de mandioca com duas inclinações diferentes da tremonha. A vazão com a tremonha com inclinação de 45° foi em média 0,611kg/s<sup>o</sup> mostrou-se 18 % mais rápida que com a tremonha com inclinação de 30° que foi em média 0,500kg/s<sup>o</sup>, podendo essa diferença de vazão mássica instantânea ser explicada pela diferença de inclinações onde a farinha de mandioca que está submetida a maior inclinação da tremonha desenvolve maior velocidade até o orifício de descarga.

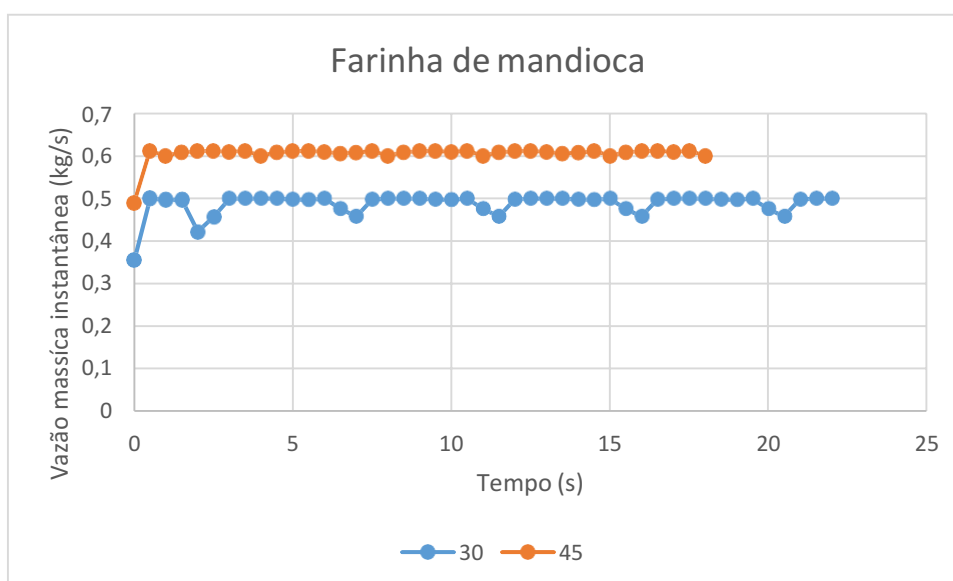


Figura 33 - - Curvas de vazão para o descarregamento da Farinha de mandioca

A Figura 34 representa o descarregamento para o açúcar cristal com três inclinações diferentes da tremonha. A vazão mássica instantânea com a tremonha de 45° mostrou-se 52 % mais rápida que com a tremonha com inclinação de 30°, e 65,52% mais rápida que com a tremonha com inclinação de 60°.

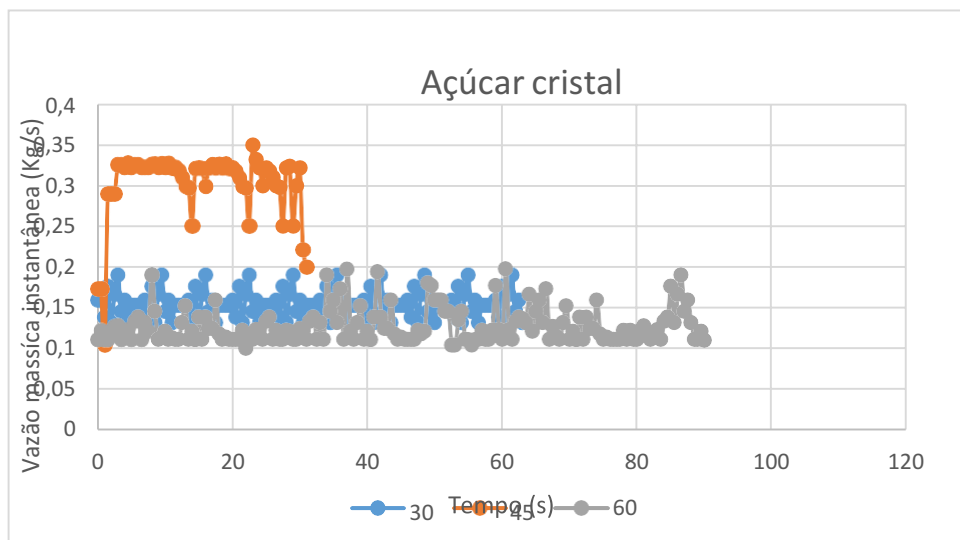


Figura 34 - Curvas de vazão para o descarregamento do Açúcar cristal

A Figura 35 representa o descarregamento do açúcar confeiteiro com inclinação de 60° e dois orifícios de descarga diferentes, 0,085 com redução para 0,030. O Orifício 1 mostrou ter uma vazão 50 % mais rápida que com o orifício 2, o fenômeno “slip stick” influenciou na velocidade de descarregamento.

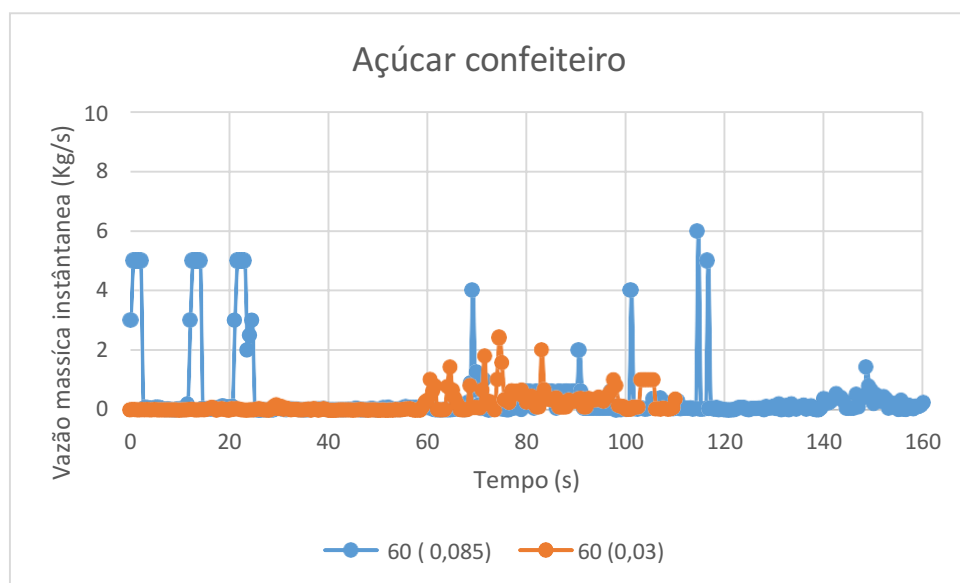


Figura 35 - Curvas de vazão para o descarregamento do açúcar confeiteiro

A Figura 36 apresenta o descarregamento do açúcar demerara com tremonhas com inclinação de 45° e 60°. Não houve fluxo com a tremonha de 45°, o mesmo tendo que ser rompido de forma manual. A tremonha de 60° apresentou vazão de 0.458Kg/s.

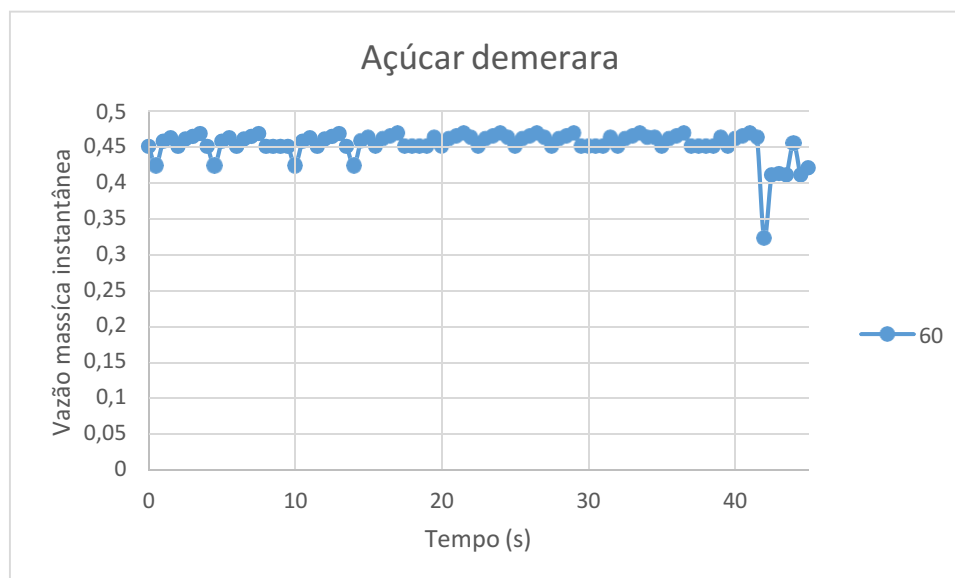


Figura 36 - Curvas de vazão para o descarregamento do açúcar demerara

## 6 CONCLUSÕES

- Com relação ao índice de fluxo dos produtos (farinha de mandioca, painço açúcar cristal e açúcar demerara) foram 8.7, 4.1, 8.3 e 10 respectivamente, classificando-os como produtos que fluem facilmente, o produto (açúcar confeiteiro) teve como índice de fluidez e 2.9 classificando-o como produto coesivo;
- Ao descarregar a farinha de mandioca seu fluxo não variou de acordo com a inclinação da tremonha, o fluxo foi do tipo massa para as inclinações de 30° e 45°;
- O fluxo de massa foi observado no painço, para as tremonhas com diferentes inclinações 30° e 45°;
- O tipo de fluxo observado no descarregamento do açúcar cristal foi tipo de massa para as duas diferentes inclinações 30 e 45°;

- Os menores valores de vazões foram observados para o açúcar confeiteiro para os dois diferentes orifícios de descargas;
- O fluxo do açúcar demerara foi tipo massa para a tremonha com inclinação de 60° e não houve fluxo com a tremonha de 45° de inclinação;
- Na comparação entre valores teóricos e experimentais de vazão mássica apresenta-se variação entre os métodos.
- Para os produtos: painço, farinha de mandioca e açúcar cristal a inclinação da tremonha que apresentou maior vazão de descarga foi a de 45°, chegando a valores que variam de 18% a 65,5% mais rápida, em relação as demais inclinações de tremonhas a que foram comparadas.

## **7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Rochas e Solo. Rio de Janeiro: 1995

AS 3774 - AUSTRALIAN STANDARD. Loads on bulk containers. Sydney: 1996.

BATISTA, C. S. Estudo teórico e experimental do fluxo de sólidos particulados em silos verticais. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande - PB, 2009, p.81.

BOWDEN, F.P.; LEBEN, L. The nature of sliding and the analysis of friction. In;Proc. of the Royal Society. Series A, n.169, p.371-391,1939.

BMHB - BRITISH MATERIALS HANDLING BOARD. Draft code of practice for the design of silos, bins, bunkers and hoppers. Berkshire: 1985.

BRASIL. Portaria nº 554 de 30 de agosto de 1995. Diário Oficial. Brasília, Secretaria da Agricultura, do Abastecimento e Reforma Agrária. 1 Set., Seção 1.

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

CALIL JUNIOR, C. Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais. São Carlos: USP, 1990. 197p.

CALIL JUNIOR, C. Sobrepeções em las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulents cohesivos. Tese (Livre Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1984.

CAMPOS, M. M. de. Análise da escoabilidade de pós. Dissertação (Mestrado).

Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, 2012, p.126

COSTA, C. A. da. Propriedades físicas, mecânicas e de fluxo de produtos agroindustriais. Dissertação (mestrado em Engenharia Agrícola). Campina Grande, 2014.

CTC- Centro de tecnologia canavieira, Determinação da umidade por secagem em estufa a 105°C em açúcar. São Paulo , 2013.

DIN 1055 - DEUTSCHE NORM.: Design loads for buildings: loads in silo bins. Berlin: 1987.

D. HIRSHFELD, Y. RADZYNER, D.C. RAPAPORT, The european physical journal  
Eur. Phys. J. E 4, 193–199 (2001)

ENSTAD, G. G. A novel theory on the arching and doming in mass flow hoppers. The Michelsen Institute, Bergen, 1981. 125p.

FAO - UNITED NATIONS FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Biofuels and the sustainability challenge: a global assessment of sustainability issues, trends and policies for biofuels and related feedstocks. Trade and Market Division. Roma, 2013a. 188p.

FREIRE, I. M. Propriedades de fluxo do feijão macassar (*Vigna unguiculata (L.) Walp.*) para o dimensionamento de silos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande – PB, 2004, p.66.

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

GARBAZZA, I. E. Programa computacional para cálculo de pressões em silos verticais de acordo com a norma australiana. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Lavras - UFLA, Lavras - MG, 2011, p.77.

ROTTER, J. M. et al. Patterns of wall pressure on filling a square planform steel silo. Engineering Structures, Elsevier Science, n.24, p.135-150, 2001.

JENIKE, A. W. Storage and flow of silos. Bulletin 123. Salt Lake City: University of Utah, 1964. 89p.

JENIKE, A. W.; JOHANSON, J. R.; CARSON, J. W. (1973). Bin loads in 3 parts. Journal of engineering for Industry, ASCE, V.95. p.1-5, 6-12, 13-20.

LOPES NETO, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B. Características de fluxo e projeto de tremonhas cônicas em silos verticais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.17, n.3, 2013, p.339-345.

MEDEIROS, I.F.DE. Características de fluxo e vazão de descarga em silos verticais. Dissertação (mestre em Engenharia agrícola) UFCG Campina Grande ,2012

NAKA ,S. Determinação das propriedades físicas dos grãos de mamona ‘guarani’ visando armazenagem em silos verticais. Dissertação ( mestre em Engenharia Agrícola na área de concentração de Tecnologia Pós-colheita ) Universidade estadual de campinas- Campinas 2010

NASCIMENTO, F.C. A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos elevados: o parâmetro k. 2008, 119 p. dissertação (mestrado em engenharia) – universidade de são carlos. São Carlos, 2008.

NASCIMENTO, J. W. B. Estudo de pressões em silos verticais metálicos com diferentes relações altura/diâmetro. Relatório técnico. CNPq - Processo: 201051/2005-2 – CNPq - 2007

MOLENDAS, M.; HORABIK, J.; BUCKLIN, R. A. ROSS, I. J. Wear-in effects on loads and flow in a conical grain bin. Transactions of the ASAE. St. Joseph, Michigan: v.40, n.3, p.783-788, 1994

PALMA G. (2005). Pressões e fluxo em silos esbeltos ( $h/d \geq 1,5$ ). Exame de Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos – PARTEC 2004 (Nuremberg, Germany, March 2004)

PROCANA. Anuário da Cana 2011 – Brazilian Sugar and Ethanol Guide. Editora ProCana: Ribeirão Preto, 2012.

RFA - RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. World Fuel Ethanol Production. Available at <http://ethanolrfa.org/pages/World-Fuel-Ethanol-Production>.

RAVENET, J. Silos. Flujo de vaciado de solidos. Formacion de bovedas. Efectos. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 335 p., 1983.



SCHULZE, D. Silo Quaking, In: Silos – Fundamentals of theory, behaviour and design, eds C.J. Brown and J. Nielsen, E & FN Spon, London, p.171-182, 1998

SCHWAB, C. V.; CURTIS, R.A.; THOMPSON, S. A. and ROSS, I. J. Vertical loading of temperature cables. Transactions of the ASAE, v.34, n.1, p.269-274, 1991.

TEIXEIRA, G.L.R. Determinação das propriedades físicas e de fluxo do café para projeto estrutural de silos e equipamentos. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Lavras, Lavras/MG, 2006. 104p.

E. FITZPATRICK, J. J. & SYNNOTT, E. C. (1999). Caracterização de alimentos em pó flowability. Journal of Food Engenharia, n 39 31-37p

TEUNOU, E., FITZPATRICK, J. J., & SYNNOTT, E. C. (1999). Characterisation of food powder flowability. Journal of Food Engineering, 31-37.

TEJCHMAN, J. Technical concept to prevent the silo honking. Powder Technology, n.106, p.7–2 WENSRICH, C. Numerical modeling of quaking in tall silos. International Journal of Mechanical Sciences, n.45, p.541–551, 2003.

## 7 – APÊNDICE

Tabela i- Análise Granulométrica da Farinha de mandioca

Produto	Abertura (mm)	% Retido	Acumulado retido %
Farinha de mandioca (500,2g)	1,00	17,450	17,45
	0,297	59,65	77,10
	0,149	14,30	91,40
	0,105	8,60	100,00

Tabela ii - Análise Granulométrica do Painço

Produto	Abertura (mm)	% Retido	Retido Acumulado %
Painço (500g)	1,40	99,27	99,27
	1,00	0,57	99,84
	0,59	0	99,84
	0,297	0	99,84

Tabela iii - Análise Granulométrica do açúcar cristal

Produto	Abertura (mm)	% Retido	Retido acumulado %
Açúcar Cristal (150g)	0,59	66,09	66,09
	0,297	28,60	94,69
	0,149	3,99	98,68
	0,105	0,75	99,43

Tabela iv - Análise Granulométrica do Açúcar Confeiteiro

Produto	Abertura (mm)	% Retido	Retido acumulado %
Açúcar Confeiteiro (150g)	0,59	59,75	59,75
	0,297	20,16	79,91
	0,149	10,0	89,91
	0,105	9,9	99,81

Tabela v - Análise Granulométrica do Açúcar Demerara

Produto	Abertura (mm)	% Retido	Retido acumulado %
Açúcar Demerara (150g)	0,59	75,29	75,29
	0,297	14,89	90,18
	0,149	9,33	99,51
	0,105	0,49	100

[+][Superior][Estrutura de arame 2D]

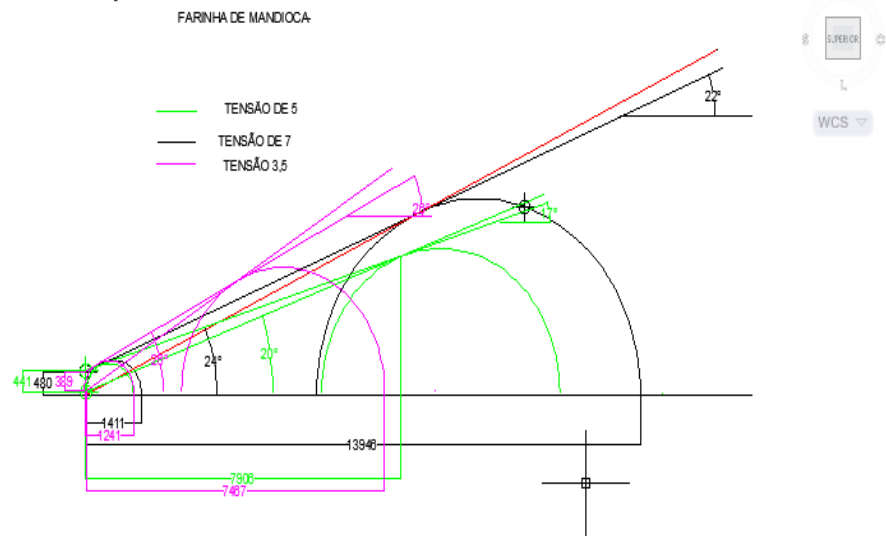


Gráfico de sobreposição de círculos de Mohr da Farinha de mandioca

[+][Superior][Estrutura de arame 2D]

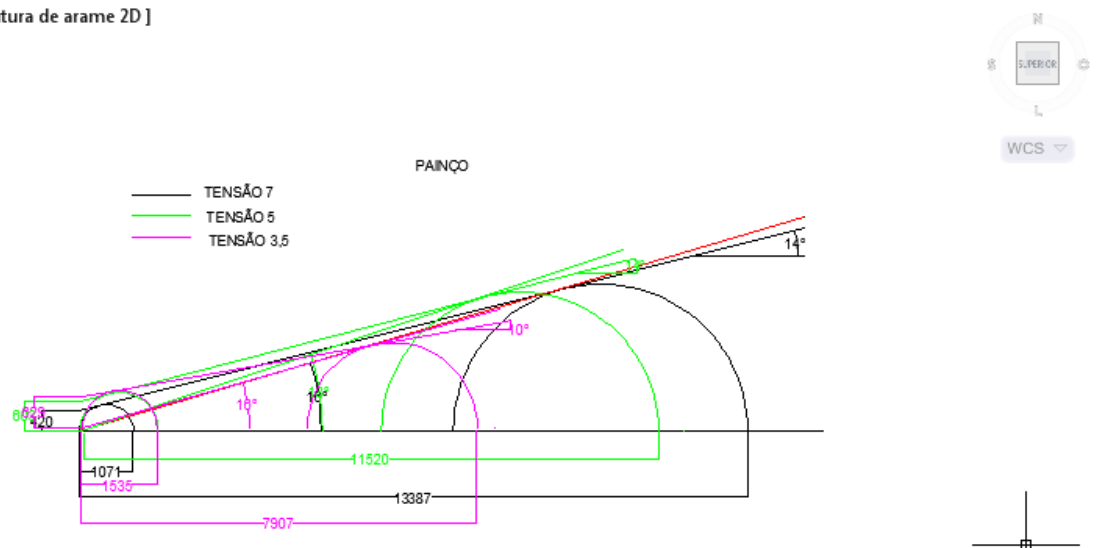


Gráfico de sobreposição de círculos de Mohr do Painço

[+]Superior[Estrutura de arame 2D]

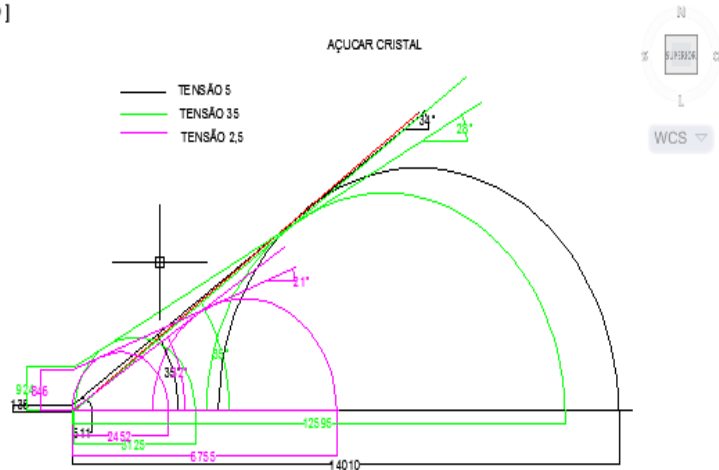


Gráfico de sobreposição de círculos de Mohr do Açúcar cristal

[+]Superior[Estrutura de arame 2D]

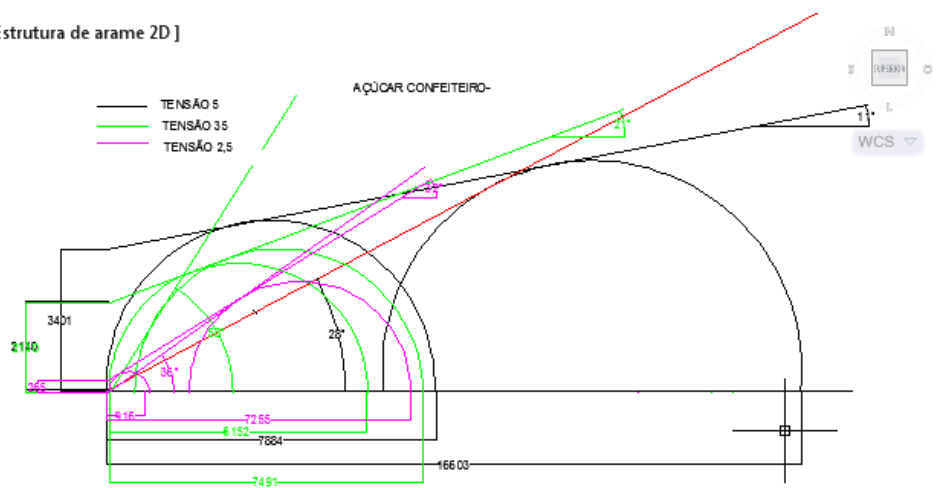


Gráfico de sobreposição de círculos de Mohr do açúcar confeiteiro

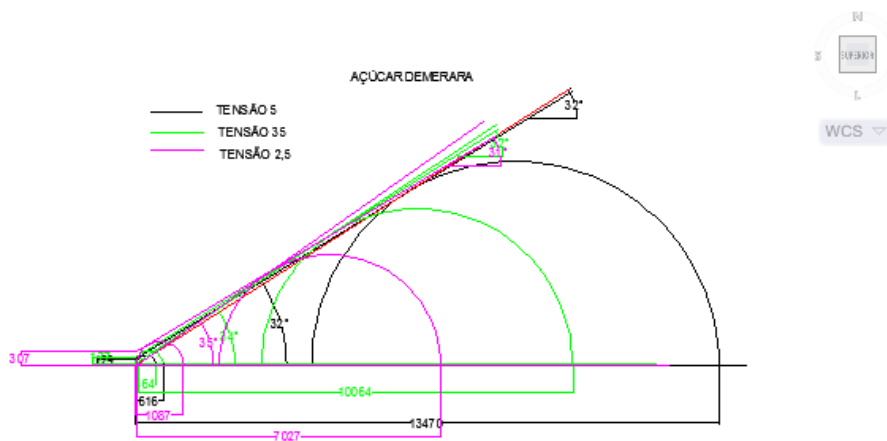


Gráfico de sobreposição de círculos de Mohr do açúcar demerara

F][Superior][Estrutura de arame 2D]

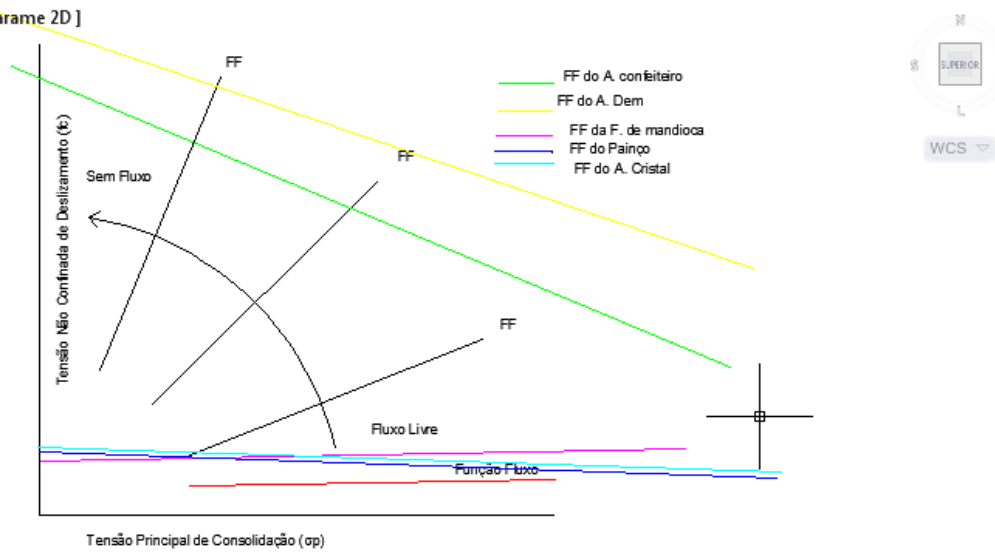


Gráfico de sobreposição da Função Fluxo dos produtos estudados

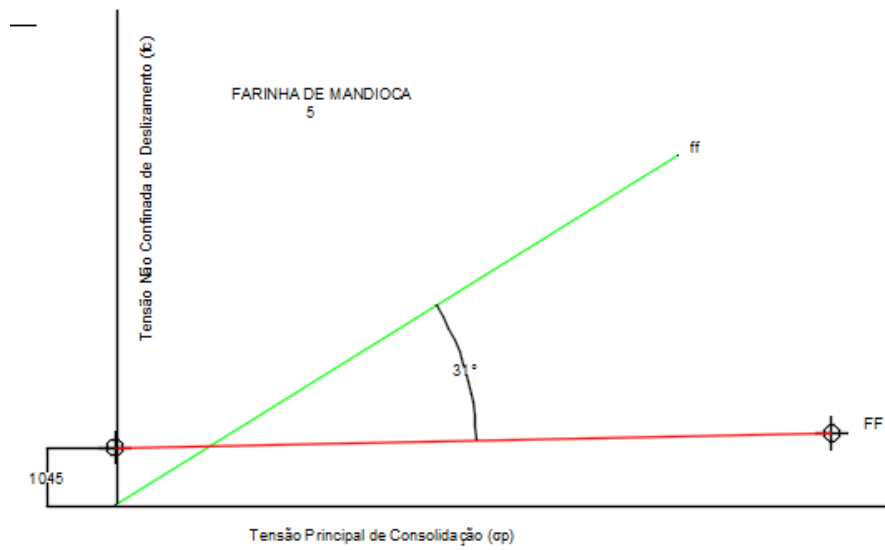


Gráfico das curvas ff, FF e valor de  $\sigma_{cr}$  para a farinha de mandioca

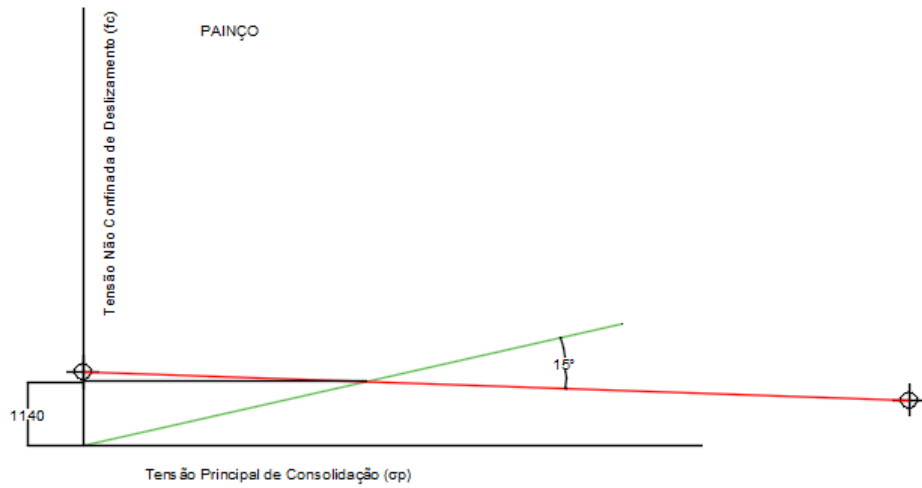


Gráfico das curvas ff, FF e valor de  $\sigma_{cr}$  para o painço

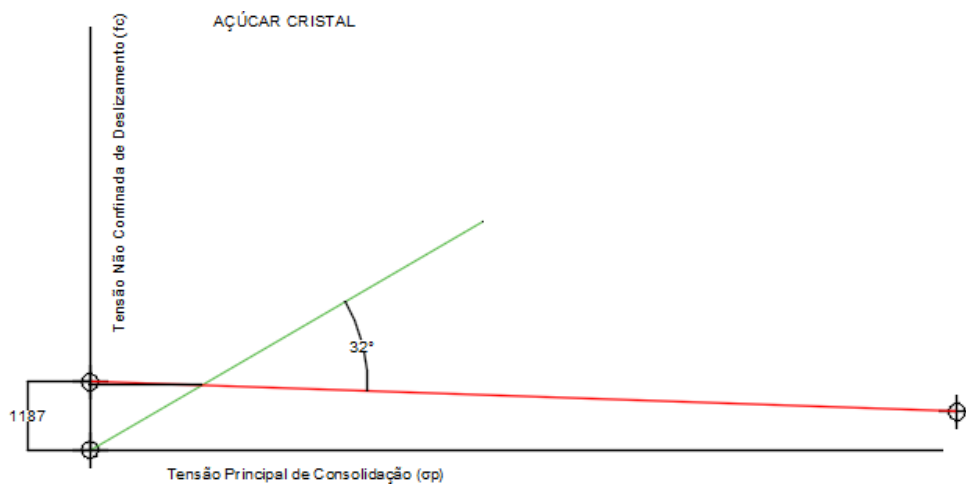


Gráfico das curvas ff, FF e valor de  $\sigma_{cr}$  para o açúcar cristal

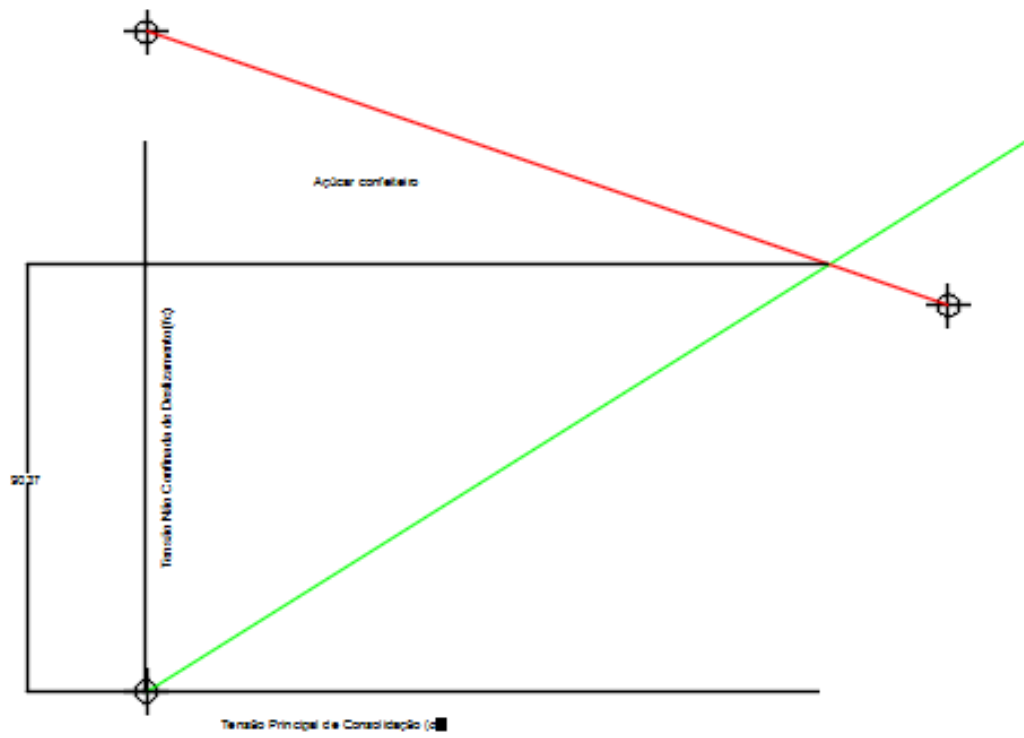


Gráfico das curvas ff, FF e valor de  $\sigma_{cr}$  para o açúcar confeiteiro

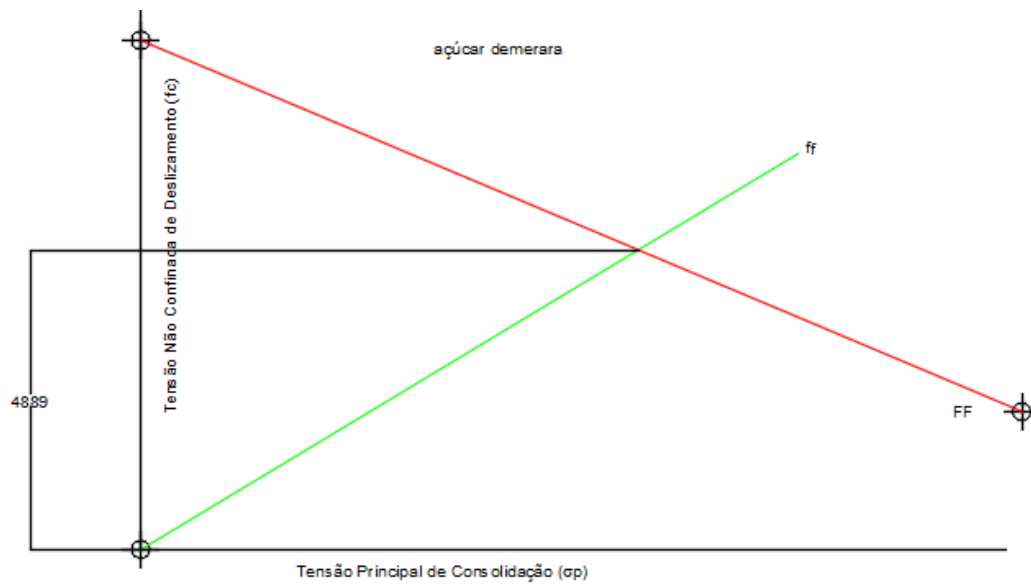


Gráfico das curvas ff, FF e valor de  $\sigma_{cr}$  para o açúcar demerara

Tabela - Valores teóricos e experimentais de vazão dos produtos estudados.

Produtos	tremonhas	Beverlee	Roter	experimental
Farinha de mandioca	30°	0,142473698	0,228045905	0,129537
	45°	0,2067855	0,61255464	0,344888
Painço	30°	0,3131269	0,3056782	0,106342
	45°	0,37939538	0,1195538	0,135741
AC1	30°	0,125759352	0,315924587	0,20896
	45°	0,1506015	0,82811053	0,58333
	60°	0,1967235	0,36758464	0,13463
AC2	60°(0,085)	0,10447971	0,40853650	0,0258
	60°(0,030)	0,06191234	0,02935687	0,0881
AC3	45°	0,0619200	0,019613927	0,00
	60°	0,1935470	0,2294120	0,458

## 8 – Anexo

Tabela A - Propriedades de fluxo de produtos sólidos (DIN 1055, 1987)

Produto	$\gamma$	$\emptyset$	Coeficiente de atrito interno		
			Canaletas	Rugosa	lisa
Cimento	16	27	0,5	0,45	0,4
Farinha	7	42	0,5	0,35	0,25
Milho	8	30	0,6	0,4	0,25
Trigo	9	30	0,6	0,4	0,25
Cevada	8	27	0,5	0,35	0,25
Açúcar	9	30	0,55	0,5	0,45
Clinquer	18	36	0,6	0,55	0,45
Cal	6	25	0,5	0,4	0,35
Areia	16	36	0,6	0,5	0,4
Fosfatos	22	27	0,55	0,5	0,4
Carvão	10	30	0,6	0,5	0,45
Soja	8	25	0,5	0,4	0,45
Calcário	13	27	0,55	0,5	0,25
Beterraba	7	30	0,55	0,45	0,4
Batata	8	30	0,5	0,4	0,35
Carvão em pó	8	25	0,55	0,5	0,4



$\gamma$  - Peso específico (kN/m<sup>3</sup>);  $\phi$  - Ângulo de atrito interno (°)

Tabela B- Valores característicos das propriedades de fluxo de produtos sólido (AS 3774, 1996)

Produto	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )		$\phi_r$ (°)	$\delta$ (°)		$\phi_w$ (°)				Fator K
						Rugosidade				
	Míni	Superior	Mínim	In	Superior	Superi	Inferi	Superi	Inferi	
Alumina	10,0	12,0	27	2	40	25	25	30	30	1,2
Cimento	13,0	16,0	28	4	50	25	23	28	28	1,2
Clínquer	15,0	18,0	33	4	52	25	25	30	30	1,2
Carvão negro	8,5	11,0	35	4	60	25	25	35	25	1,4
Carvão	7,0	9,0	33	4	65	25	25	35	35	1,4
Carvão em pó	6,0	9,0	38	4	50	24	24	28	27	1,2
Agreg. 0 a	17,0	19,0	34	3	40	25	18	30	25	1,3
Farinha de	6,5	7,5	40	2	30	23	25	28	25	1,4
Cinza volante	8,0	11,5	11,5	3	35	25	25	35	30	1,2
Min. de ferro,	19,0	22,0	35	3	45	25	26	33	28	1,3
Cal hidratada	6,0	8,0	40	3	45	25	25	33	30	1,2
Pedra calcária	11,0	13,0	30	4	60	25	23	30	28	1,3
Milho	7,0	8,5	30	2	33	25	20	30	25	1,6

Rocha	16,0	19,0	27	3	55	25	22	30	25	1,3
Areia grossa	14,0	17,0	30	3	40	25	22	28	25	1,3
Areia fina	15,0	17,0	30	3	40	22	15	22	20	1,4
Esc. dealto-	10,5	12,0	40	3	38	22	20	25	24	1,4
Soja	7,0	8,0	23	2	32	15	12	18	14	1,4
Açúcar	8,0	10,0	29	3	38	25	20	35	25	1,2
Trigo	7,5	9,0	20	2	32	25	18	30	25	1,4

$\gamma$  = peso específico consolidado;  $\phi_r$  = ângulo de repouso;  $\delta$  = ângulo efetivo de atrito interno;  $\phi_w$  = ângulo de atrito do produto com a parede; e  $K$  = relação entre pressão vertical e horizontal. Para rugosidade do Tipo 4, consultar Apêndice B da norma AS 3774 (1996).