

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO CONSTRUÇÕES RURAIS E AMBIÊNCIA

**MÁQUINA DE CISALHAMENTO DIRETO POR TRANSLAÇÃO PARA
DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE FLUXO DE PRODUTOS
ARMAZENÁVEIS**

Campina Grande - PB

Brasil

2020

YOKINY CHANTI CORDEIRO PESSOA

**MÁQUINA DE CISALHAMENTO DIRETO POR TRANSLAÇÃO PARA
DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE FLUXO DE PRODUTOS
ARMAZENÁVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, área de Concentração Construções Rurais e Ambiente da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. José Wallace B. do Nascimento

Campina Grande - PB

Fevereiro - 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

YOKINY CHANTI CORDEIRO PESSOA

**MÁQUINA DE CISALHAMENTO DIRETO POR TRANSLAÇÃO PARA
DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE FLUXO DE PRODUTOS
ARMAZENÁVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, área de Concentração Construções Rurais e Ambiente da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Dissertação apresentado e aprovado em 28 / 02 / 2020, pela seguinte Banca Examinadora:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Wallace B. do Nascimento
Orientador – UAEA / CTRN / UFCG

Prof. Dr. José Pinheiro Lopes Neto
Examinador - UAEA / CTRN / UFCG

Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes
Examinador – UFLA / DEA

Campina Grande - PB
Fevereiro - 2020

Aos meus pais, Lindete e Paulo Pessoa (In memória),
e as minhas irmãs, Yroschima e Yochabell,
pelo estímulo e apoio,
a meu marido, Galba,
e a minha filha, Maria Luiza,
pelo amor, paciência e carinho,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois sem ele nada seria possível!

Ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de participar da Pós-Graduação.

Aos professores José Wallace Barbosa do Nascimento e José Pinheiro Lopes Neto, pela orientação, confiança, apoio e ajuda na elaboração deste trabalho.

Aos professores da Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pelos ensinamentos transmitidos durante o curso, bem como a todos os funcionários e terceirizados que fazem parte deste programa.

A minha família por ser o alicerce da minha vida, por sempre me incentivar e dar todo suporte necessário para que Eu alcance meus objetivos.

Ao meu esposo Galba Falcão Aragão, pela compreensão, incentivo e ajuda dispensada no desenvolvimento deste trabalho.

A minha filha Maria Luiza Pessoa Aragão, pela colaboração para que chegássemos até aqui.

As amigas: Valquíria, Jaciara, Joelma, Ariadne e Valneide, pela colaboração e por acreditarem na realização de todos os trabalhos que fizemos juntos.

A todos os colegas de curso que fizeram essa caminhada mais suave e repleta de surpresas e alegrias.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE SIMBOLOS/ABREVIATURAS	X
RESUMO	XI
ABSTRACT	XII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo geral.....	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Hipóteses	4
1.4. Meta	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Silos.....	5
2.2. Aparelhos para Determinação das Propriedades de Produtos Armazenados.....	7
2.3. Determinações das propriedades físicas do produto	8
2.3.1. Teor de umidade.....	8
2.3.2. Granulométrica.....	9
2.4. Determinações das propriedades de fluxo dos produtos	9
2.4.1. Densidade do produto (γ)	10
2.4.2. Determinação das Tensões.....	10
2.4.3. Ângulo de atrito interno (ϕ_i).....	12
2.4.4. Tensão de consolidação principal máxima (σ_m)	12
2.4.5. Tensão inconfínada (σ_c)	12
2.4.6. Efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e).....	12
2.4.7. Função Fluxo (FF).....	13
3. MATERIAL E MÉTODOS	14

3.1. Localização do experimento.....	14
3.2. Materiais.....	14
3.3 Métodos.....	15
4. DESENVOLVIMENTO	18
4.1. Dispositivo de tração.....	18
4.2. Dispositivo de compressão.....	19
4.3. Controle e aquisição de dados.....	22
4.4. Gabinete do equipamento.....	26
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
5.1. Propriedades físicas dos produtos ensaiados.....	30
5.1.1 Granulometria e teor de umidade.....	30
Fonte: Próprio autor (2018).....	31
5.2. Propriedades de fluxo dos produtos ensaiados.....	31
5.2.1. Peso específico consolidado (γ)	33
5.2.2. Ângulo de atrito interno (ϕ_i)	34
5.2.3. Efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e).....	35
5.2.4. Coesão (c).....	36
5.2.5. Função fluxo.....	36
6.CONCLUSÕES.....	38
7.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	39
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aparelhos de cisalhamento	7
Figura 2. Representação dos Círculos de Mohr	11
Figura 3. TSG 70-140.....	16
Figura 4. Protótipo.....	16
Figura 5. Dispositivo de tração	18
Figura 6. Suporte da base da célula de cisalhamento	19
Figura 7. Base e o anel da célula de cisalhamento	19
Figura 8. Dispositivo de compressão	20
Figura 9. Dispositivo de torção	20
Figura 10. Célula de carga da compressão.....	21
Figura 11. Tampa da célula de cisalhamento e molde de consolidação.....	21
Figura 12. Display touch screen 7”	22
Figura 13. Tela de apresentação do projeto.....	22
Figura 14. Tela inicial	22
Figura 15. Tela de configuração.....	23
Figura 16. Tela de consolidação.....	23
Figura 17. Tela de pré-cisalhamento	24
Figura 18. Tela de cisalhamento	24
Figura 19. Tela de salvamento dos dados	25
Figura 20. Tela do teclado.....	25
Figura 21. Arduino Mega 2560	25
Figura 22. Gabinete do equipamento	26
Figura 23. Preparação da superfície do gabinete.....	27
Figura 24. Aplicação do prime	27
Figura 25. Aplicação da tinta cinza.....	27
Figura 26. Aplicação da tinta azul.....	28
Figura 27. Montagem	28
Figura 28. Suporte da tampa	28
Figura 29. Painel frontal.....	29
Figura 30. Equipamento embalado.....	29
Figura 31. Curva granulométrica dos produtos ensaiados	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação do produto de acordo com a granulometria	9
Tabela 2. Limite de FF	13
Tabela 3. Equipamentos utilizados no projeto	14
Tabela 4. Níveis de carga utilizados nos ensaios de farinha de mandioca.....	32
Tabela 5. Níveis de carga utilizados nos ensaios do painço e m.....	32
Tabela 6. Resultados obtidos nos ensaios de propriedades TSG 70-140	33
Tabela 7. Resultados obtidos nos ensaios de propriedades TSG 70-140	33
Tabela 8. Resultados obtidos nos ensaios de propriedades MCDT	33
Tabela 9. Resultados obtidos nos ensaios de propriedades MCDT	33

LISTA DE SIMBOLOS/ABREVIATURAS

γ	Peso específico consolidado
ϕ_i	Ângulo de atrito interno
ϕ_e	Efetivo ângulo de atrito interno
FF	Função fluxo
σ_c	Tensão inconfínada
σ_m	Tensão de consolidação principal máxima
σ_p	Tensão normal no pré-cisalhamento
τ_p	Tensão de cisalhamento no pré-cisalhamento
σ	Tensão normal no cisalhamento
τ_j	Tensão de cisalhamento (obtida na Jenike)
τ_c	Tensão de cisalhamento (calculada)
LG	Lugar geométrico
LGD	Lugar geométrico de deslizamento
ELGD	Efetivo lugar geométrico de deslizamento
MCDT	Máquina de cisalhamento direto por translação

RESUMO

PESSOA, Yokiny Chanti Cordeiro. **Máquina de cisalhamento direto por translação para determinação de propriedades de fluxo de produtos armazenáveis**. 2020. 55p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB.

Sendo o Brasil um dos maiores produtores de grãos do mundo, batendo recordes de produção a cada safra, a necessidade de armazenar os produtos é crescente e não acompanha o crescimento da produção. Silos são estruturas difíceis de projetar devido às particularidades de cada produto a ser armazenado, os produtos armazenados são capazes de transmitir tensões de atrito entre grãos e nas paredes, sendo necessários os estudos de propriedades físicas e de fluxo dos produtos para o material inerte e em movimento durante o enchimento e esvaziamento do silo. Para a determinação de tais propriedades é necessário o estudo e a aplicação da metodologia de tipo de fluxo de Jenike que são de relevante importância para o conhecimento das propriedades físicas e de fluxo dos produtos armazenáveis, uma vez que o mesmo é referência adotada para esses ensaios pelas mais distintas normas estrangeiras e pela norma internacional ISO 11697:2012. Os estudos acima citados ajudam a prever o comportamento dos produtos durante o manuseio e processamento. Este projeto tem como objetivos: Desenvolver uma máquina de cisalhamento direto por translação para determinação de propriedades de fluxo de produtos visando uniformização do processo, com base na célula de cisalhamento de Jenike e sem a influência do operador durante o ensaio.

Palavras-chave: silos, cisalhamento, aquisição de dados.

ABSTRACT

PESSOA, Yokiny Chanti Cordeiro. **Direct shearing machine by translation to determine the flow properties of storable products.** 2020. 55p. Dissertation (Masterin Agricultural Engineering) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB.

Brazil is one of the largest grain producers in the world, breaking production records with each harvest, the need to store products is growing and does not keep up with production growth. Silos are structures that are difficult to design due to the particularities of each product to be stored, the stored products are capable of transmitting frictional tensions between grains and on the walls, making it necessary to study the physical properties and flow of the products for the inert material and in movement during the filling and emptying of the silo. For the determination of such properties, it is necessary to study and apply the Jenike flow type methodology, which are of relevant importance for the knowledge of the physical and flow properties of the storable products, since it is the reference adopted for these tests the most distinct foreign standards and the international standard ISO 11697: 2012. The studies mentioned above help to predict the behaviour of products during handling and processing. This project aims to: Develop a direct shearing machine by translation to determine product flow properties in order to standardize the process, based on the Jenike shear cell and without the influence of the operator during the test.

Keywords: silos, shear, data acquisition.

1. INTRODUÇÃO

Desde o início da civilização que o ser humano necessita guardar alimentos para sua sobrevivência. Com o crescimento populacional, a necessidade de produzir mais alimentos e em um espaço menor de tempo, fez crescer a necessidade de armazenar o alimento produzido para facilitar seu transporte, baratear os custos e garantir uma reserva de subsistência para as populações.

O crescimento populacional no Brasil e no mundo impulsionaram a produção agrícola fazendo com que a cada ano sejam alcançados novos recordes de produção agrícola. Infelizmente aqui no Brasil a capacidade de armazenamento não consegue acompanhar o aumento da produção gerando um déficit da capacidade armazenadora. Esse déficit na quantidade e capacidade de silos mostra a importância do desenvolvimento de pesquisas nessa área. Como ainda não há uma norma regulamentadora brasileira para o dimensionamento de silos, fabricantes utilizam normas internacionais, ou nem utilizam.

A Companhia Nacional de Abastecimento, no seu 5º Levantamento da Safra de Grãos 2017/2018 (CONAB, 2018), relata que a produção de grãos na safra 2017/2018 pode chegar a 225,6 milhões de toneladas, segundo lugar em relação à série histórica.

Os silos são estruturas de fundamental importância para o armazenamento de produtos agrícolas e industriais, quando bem projetados e estrategicamente posicionados tornam o sistema produtivo mais eficaz e economicamente viável. Os silos possuem vantagens na indústria pela utilização eficiente de espaço, conservação do estoque e abastecimento do processo de fabricação.

Apesar dos estudos e pesquisas, em todo o mundo, ainda são encontrados problemas estruturais (problemas de fundação, colapso estrutural, flambagem, deformação) ou de fluxo no descarregamento (efeito tubo, formação de arcos coesivos, segregação e explosão).

As determinações das características dos produtos sólidos armazenados em silos têm sido objeto de estudo de muitos pesquisadores ao longo dos tempos servindo de base para que projetistas e engenheiros possam dimensionar não só os silos, mas os demais equipamentos de transporte capaz de promover a retirada do produto ali contido com a maior eficiência.

Como prevenção aos problemas de fluxo, é necessária investigação ampla das propriedades físicas e de fluxo dos produtos que serão utilizados. Desta forma é possível prever tipo de fluxo mais adequado dos produtos armazenáveis em silos e evitar obstruções na descarga, maximizando operações de descargas, dosagem e empacotamento (JULIANO et al., 2006).

A determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados também é muito importante para o processamento dos sistemas de armazenagem durante o carregamento e o descarregamento. (Nascimento, 1996). Segundo Calil Jr e Cheung (2007), estas determinações devem ser realizadas nas condições mais severas daquelas esperadas em um silo.

O aparelho de cisalhamento direto por translação de Jenike, também conhecido como “Jenike Shear Cell” é o equipamento mais utilizado no mundo em pesquisas para a determinação de propriedades físicas, do índice de fluxo do produto e do diâmetro mínimo de descarga, no entanto, o procedimento utilizado consiste na leitura dos dados gerados através dos ensaios e apresentados em gráficos plotados e/ou impressos, onde os dados obtidos nos gráficos são aplicados nas equações e posteriormente transferidos para uma plataforma gráfica onde são construídos os círculos de Mohr. Por ser um processo onde o operador tem influência na realização do ensaio, nas leituras e interpretação dos gráficos, este fator pode induzir a um erro em cascata o que levaria o pesquisador a resultados indesejados.

Contudo que foi abordado, o presente trabalho tem como objetivo determinar as propriedades físicas de produtos armazenáveis com base no princípio de cisalhamento direto por translação desenvolvido por Jenike, buscando automatizar o processo para alcançar a uniformização dos dados.

1.1.Justificativa

O armazenamento dos produtos de forma adequada possui fundamental importância para se evitar perdas, preservar a qualidade dos alimentos e suprir as demandas na entre safra possibilitando assim maior competitividade das atividades. Consoante com Calil Jr e Cheung

(2007), a utilização de silos para a armazenagem de grãos é considerada uma solução de grande viabilidade devido à economia de espaço, mão de obra e custo de transporte, assim como a possibilidade de conservação do produto ensilado.

A principal diferença entre os produtos armazenados e os fluídos, é que os produtos armazenados são capazes de transmitir tensões de atrito entre os grãos e entre os grãos com a parede. Tornando o estudo do fluxo de fundamental importância para subsidiar o projeto estrutural e o tipo de fluxo nos silos, como também para avaliar o escoamento dos sólidos evitando a obstrução do fluxo no descarregamento. Os principais tipos de obstruções: o arco coesivo (formado pelo resultado da consolidação e resistência do sólido armazenado), arco mecânico (obtido pelo entrosamento das partículas do sólido e ocorre devido principalmente às dimensões das partículas serem grandes quando comparadas com a boca de descarga) e à formação de tubo (ocorre quando o sólido armazenado adquiriu resistência suficiente para suportá-lo, sendo esta resistência função do grau de consolidação). Esses problemas de descarga acarretam prejuízos às indústrias.

A construção de uma máquina de cisalhamento direto por translação onde o pesquisador/operador não tem influência direta no resultado do ensaio proporcionará maior confiabilidade aos dados, uma vez que os dados gerados pelo equipamento e coletados pelo sistema de aquisição de dados com base na plataforma Arduino serão disponibilizados no formato adequado para a aplicação de análise possa gerar os gráficos necessários para obtenção da informação sem que ocorra a interferência, ou indução de erros, que podem ocorrer em um processo manual.

1.2.Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

- Desenvolver uma máquina de cisalhamento direto por translação para determinação de propriedades de fluxo de produtos visando uniformização do processo.

1.2.2. Objetivos específicos

- Projetar e construir as partes mecânicas da máquina de cisalhamento direto por translação;

- Projetar e realizar a plataforma de interface de dados entre a célula de cisalhamento e o Arduino;
- Programar a interface gráfica do display touchscreen;
- Construir o gabinete (estrutura) de suporte da máquina de cisalhamento;
- Comparar os resultados com a TSG 70-140 (Jenike Shear Cell).

1.3.Hipóteses

- A parte mecânica deve ser capaz de realizar o ensaio de cisalhamento sem a interferência do operador;
- O componente de prototipagem escolhido, nesse caso o Arduino, deve ser capaz de realizar a interface entre o dispositivo de entrada, display touchscreen, e a célula de cisalhamento. Bem como salvar os dados do ensaio em um formato compatível com programas que permitam a análise desses dados;
- Programar o display touchscreen para que ele funcione como dispositivo de entrada de dados e permita visualizar graficamente a amostra que está sendo ensaiada.

1.4.Meta

Demonstrar que o equipamento funciona sem a interferência do operador em ensaios, conferindo assim maior confiabilidade aos dados obtidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Silos

Denomina-se célula o compartimento onde fica armazenado o produto. Um silo pode ter uma célula (silo unicelular) ou mais células (silo multicelular). A seção transversal da célula poderá ser circular, quadrada, retangular ou mesmo poligonal, de acordo com a necessidade. Sendo que os silos podem ser construídos com os mais variados materiais como concreto armado, fibra de vidro, chapa de aço liso ou ondulado, madeira, alvenaria de blocos cerâmicos ou de concreto (Freitas, 2001).

Outros parâmetros geométricos também diferenciam os silos, como, por exemplo, o tipo de fundo, que pode se apresentar de forma cônica (ou com tremonha) ou plana. Os silos cilíndricos são ditos verticais quando o diâmetro da base for menor que a altura e horizontais quando contrário, sendo que os verticais exigem menor investimento por quantidade unitária armazenada.

O modo como o produto escoar por gravidade em um silo é determinada, por um lado, pelas propriedades de fluxo do produto e, por outro lado, pela geometria e estrutura da superfície da tremonha. Os silos verticais são estruturas com elevado índice de deformações excessivas e rupturas causadas, principalmente, pelo desconhecimento da variabilidade nas pressões devidas ao produto armazenado.

Naka (2010) relata que os fatores que influenciam o comportamento de um produto durante a descarga são a rugosidade da parede do silo, o ângulo de atrito interno, a forma e a inclinação das paredes da moega e o tamanho do orifício de saída. Em sistemas de descarga por gravidade, cuidados devem ser tomados durante o dimensionamento do silo, pois o sistema de descarga gera diferenças de pressões que atuam nas paredes do silo quando a descarga está ocorrendo podendo gerar os arcos coesivos que são capazes de restringir parcial

ou completamente a descarga, estando sua ocorrência relacionada às geometrias dos silos e das tremonhas.

Para Teixeira (2006), o dimensionamento de um silo pode ser sistematizado através de um procedimento que congregue as informações e cálculos necessários, cujo principal foco é garantir um fluxo mássico do produto armazenado. Sendo que neste tipo de fluxo o escoamento do produto particulado permanece uniforme, sem que ocorra a existência de uma zona de estagnação devido à formação de obstrução por arcos. Fato esse que implica na dimensão da abertura de descarga de um silo, a qual deve ter uma dimensão suficiente para que não ocorram obstruções durante a descarga do produto armazenado.

O efeito do tempo de armazenagem de produtos favorece a formação de um estado de tensão de compressão, fazendo com que o produto adquira resistência e forme arcos coesivos que interferem na escoabilidade, provocando a obstrução do fluxo.

Um dos pioneiros no estudo do comportamento de sólidos foi Jenike (1964), que estabeleceu uma teoria para a análise do escoamento de sólidos e uma metodologia para o projeto de silos.

A abordagem baseada na teoria de Jenike, ao desenvolver o aparelho de cisalhamento direto por translação conhecido como “Jenike Shear Cell” para a determinação do ângulo de atrito interno, ângulo de atrito com a parede, densidade consolidada, função fluxo e índice de fluxo, contribuiu para o desenvolvimento dos padrões de fluxo em silos, de massa e funil, que são fundamentais para o projeto de silos verticais.

Schulze (2009) descreve que o Jenike Shear Cell utiliza um conjunto de células para reproduzir o cisalhamento em amostras de produtos armazenáveis sendo possível traçar círculos de tensão (círculos de Mohr) que representam graficamente o estado de tensão em uma porção de produto armazenado possibilitando a determinação de tensões de consolidação (σ_m), tensões não confinadas de deslizamento (σ_c) e de ângulo de atrito interno (ϕ_i) de produtos armazenáveis (Lopes Neto et al., 2007).

Através de uma análise bidimensional dos esforços, é possível o desenvolvimento de uma metodologia matemática capaz de determinar o ângulo mínimo da tremonha e dimensão de seu orifício de descarga, para o fluxo de massa funil para as formas cônicas e de cunha. A função fluxo é uma medida da escoabilidade do produto e pode ser utilizada para a obtenção da abertura mínima de descarga do silo de forma a prevenir a obstrução do fluxo.

2.2. Aparelhos para Determinação das Propriedades de Produtos Armazenados

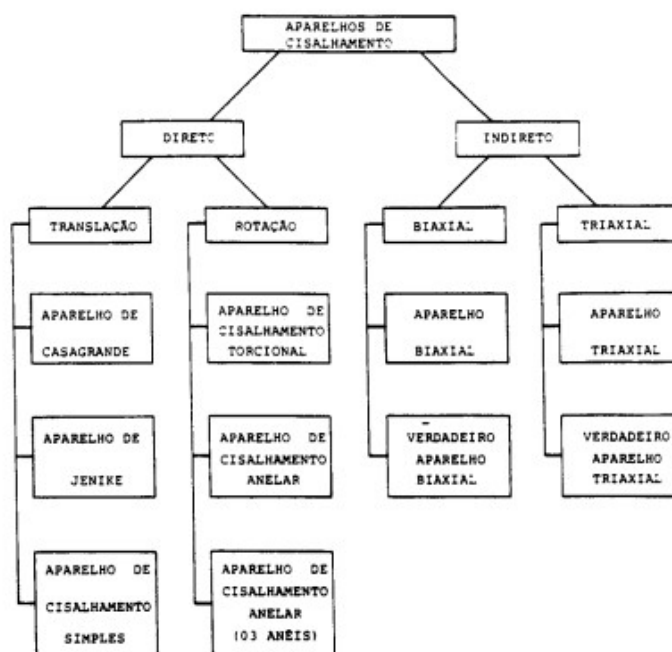
Schwedes e Schulze (1990) realizaram um trabalho separando os equipamentos em dois grupos: os ensaios de obtenção direta e os de medida indireta. Ao final do trabalho eles afirmaram que o equipamento triaxial fornece resultados com maior exatidão, pois obtém as relações tensão deformação do material. Já o anel de cisalhamento fornece boas propriedades do produto em fluxo, pois permite alta velocidade de deslocamento angular, e conseqüentemente reproduz mais fielmente o fluxo.

No Brasil, Milani (1993) desenvolveu um importante trabalho com base em estudos teóricos e experimentais utilizando o equipamento de Jenike, propondo uma metodologia de ensaio para a determinação das propriedades dos produtos armazenados. Porém, segundo Rotter et al. (1998), uma descrição completa de todas as propriedades de fluxo é atualmente impossível, pois ainda não são conhecidos todos os parâmetros que deveriam ser medidos, nem como algumas das propriedades conhecidas deveriam ser medidas.

Os equipamentos apropriados para obtenção das propriedades de fluxo são os de cisalhamento, onde o cisalhamento dos produtos pode ocorrer de duas formas: ensaios de medição direta e os ensaios de medição indireta.

Os aparelhos de cisalhamento são divididos da seguinte forma:

Figura 1. Aparelhos de cisalhamento



Fonte: MILANI (1993)

Muitos pesquisadores estudaram e vêm estudando as propriedades físicas dos produtos nas fases de operação do silo (carregamento, armazenamento e descarregamento). Jenike (1964), em busca de uma forma adequada de medir tais propriedades, analisou inicialmente a aplicabilidade de equipamentos de teste utilizados em solo. Diante dos resultados considerados insatisfatórios, decidiu desenvolver um aparelho denominado “Jenike Shear Cell”, que vem sendo utilizado e ainda consagrado para a determinação das propriedades físicas dos materiais. O aparelho é baseado no ensaio de cisalhamento direto de solos, porém alguns procedimentos de consolidação da amostra (torção) foram adicionados para representar o comportamento do produto dentro das estruturas de armazenamento.

Porém apesar dos avanços nos equipamentos de ensaio, ainda hoje, o aparelho de Jenike é o mais utilizado para caracterização das propriedades dos produtos armazenados e por isso será utilizado como referência nesta pesquisa.

Em resumo, o teste de cisalhamento constitui-se de duas fases. A primeira é a preparação da amostra para a obtenção do fluxo de estado estável e do pré-cisalhamento para a definição do lugar geométrico e deslizamento. Na segunda fase o teste, a determinação real das tensões de cisalhamento é realizada com diferentes valores de tensões normais, menores que a utilizada na primeira fase, determinando as tensões de cisalhamento necessárias para o deslizamento (ruptura) do produto.

2.3. Determinações das propriedades físicas do produto

2.3.1. Teor de umidade

Seguindo a determinação proposta por Batista (2009), a umidade deve ser efetuada em triplicata, utilizando-se 10 g do produto para cada repetição. As amostras devem ser colocadas em recipientes de alumínio, em seguida pesadas em balança com precisão de 0,001 g para obtermos a massa total do produto (P_u), e levadas à estufa com circulação forçada de ar a temperatura de 105 com tolerância de + 3° C, por 24 h. Em seguida, os recipientes são resfriados em dessecador, novamente pesados obtendo-se a massa seca (P_s). A umidade é calculada usando-se a Equação:

$$W = \frac{P_u - P_s}{P_u} 100 \quad (1)$$

Onde:

- W – umidade (% base úmida);
- Pu – Peso úmido (g);
- Ps – Peso seco (g).

2.3.2. Granulométrica

A granulometria ou análise granulométrica é o processo que visa definir, para determinadas faixas pré-estabelecidas de tamanho de grãos, a percentagem em Massa que cada fração possui em relação à massa total da amostra em análise.

Para a determinação granulométrica Batista (2009), sugere utilizar um conjunto de peneiras padrão ABNT/ ASTM, as quais são montadas em ordem decrescente, em função da malha, e agitadas em um vibrado elétrico por um período de 5 minutos.

Após esse processo, as peneiras são 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.

A classificação dos produtos será em função das dimensões do diâmetro de suas partículas, com base no proposto por Calil Jr. (1984), sendo:

Tabela 1. Classificação do produto de acordo com a granulometria

D > 0,420 mm	Granulares;
0,420 < D < 0,149 mm	Pulverulentos coesivos;
0,146 < D < 0,079 mm	Pulverulentos coesivos finos;
D < 0,079 mm	Pulverulentos coesivos extrafinos.

Fonte: Calil (1984)

2.4. Determinações das propriedades de fluxo dos produtos

A determinação das propriedades de fluxo é de essencial relevância para possibilitar os procedimentos de cálculo de fluxo, bem como o de pressões em silos. Por tal motivo, o estudo de produtos cujas propriedades ainda não foram determinadas, deve ser realizado visando o aumento de dados disponíveis aos engenheiros projetistas.

2.4.1. Densidade do produto (γ)

O cálculo de densidade (peso específico) pode ser realizado pela divisão da proporção do peso (P) de uma quantidade de sólidos a granel, pelo seu volume (V), tendo como unidade N/m³.

$$\gamma = \frac{(Massa\ Total - mass\ do\ anel\ base - massa\ do\ anel\ cisalhante - massa\ da\ tampa) * 9,81}{Volume\ (anel\ base + anel\ cisalhante)} \quad (2)$$

A densidade esta sujeita a diversos fatores, como estado de "compactação" ou "compressão" da massa sólida, ou seja, é a amplitude da tensão de consolidação atuando sobre o produto sólido.

Segundo Calil Jr (2007), a densidade do produto não pode ser usada como um fator de fluxo. Não há uma relação linear direta entre fluxo e densidade, entretanto, a densidade de um produto precisa ser calculada, pois é um parâmetro importante para determinação do fluxo e das pressões em silos.

2.4.2. Determinação das Tensões

O cálculo das tensões no pré-cisalhamento (tensão normal e tensão de cisalhamento), bem como as tensões no cisalhamento (tensão normal e tensão de cisalhamento), é realizado usando as seguintes equações:

➤ Pré-cisalhamento

✓ Para Tensão Normal:

$$\sigma_p = \frac{(massa\ do\ disco + massa\ da\ haste + massa\ da\ tampa) * g}{A} \quad (3)$$

✓ Para Tensão de Cisalhamento:

$$\tau_p = \frac{massa\ cisalhante * g}{A} \quad (4)$$

Observando que aceleração da gravidade (g) é igual a $9,81 \text{ m/s}^2$.

➤ *Cisalhamento*

✓ *Para Tensão Normal:*

$$\sigma_c = \frac{(\text{massa do disco} + \text{massa da haste} + \text{massa da tampa}) * g}{A} \quad (5)$$

✓ *Para Tensão de Cisalhamento:*

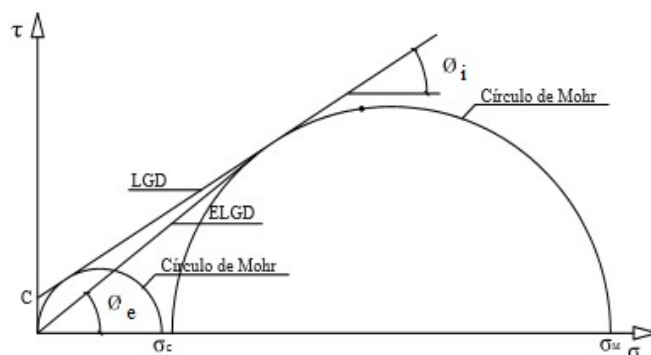
$$\tau_j = \frac{\text{massa cisalhante} * g}{A} \quad (6)$$

$$\tau_c = \tau_j \frac{\bar{\tau}_p}{\tau_p} \quad (7)$$

Em que: τ_j é a tensão cisalhamento obtida diretamente na máquina de Jenike.

Com os dados acima citados, são elaborados os Gráficos do Semicírculo de Mohr, como pode ser observado na Figura 2. Trata-se de método gráfico bidimensional, onde a abscissa (σ_c) e a ordenada (τ_c) de cada ponto do círculo são as magnitudes da tensão normal e da tensão cisalhante atuando sobre um sistema de coordenadas rotacionado.

Figura 2. Representação dos Círculos de Mohr



O círculo de Mohr deve ser desenhado para cada “família” de massa e para os três ensaios. São elaborados, portanto, nove gráficos. O valor da coesão é dado pelo ponto que a reta de lugar geométrico toca na reta da ordenada.

A maior intercessão do círculo grande com a reta abscissa será σ_m (tensão máxima principal) que é igual σ_i (a tensão não confinada). Por sua vez, a maior intercessão do círculo menor com a reta abscissa será σ_c (tensão incondfinada).

2.4.3. Ângulo de atrito interno (ϕ_i)

O ângulo de atrito interno (grão/grão) varia conforme produto e obedece a uma forte relação com o tipo e da superfície do produto, além da pressão na superfície do produto (compressão) e da umidade.

A determinação do ângulo de atrito interno (ϕ_i) está relacionada com o conhecimento do lugar geométrico (LG). Para traçar a reta LG é necessário conhecer as tensões normais e suas correspondentes tensões cisalhantes, formando, no mínimo, três pontos de coordenadas. A união destes pontos forma a lugar geométrico de deslizamento (LGD).

2.4.4. Tensão de consolidação principal máxima (σ_m)

O semicírculo é desenhado passando através do ponto P (que é a média das tensões normais no pré-cisalhamento) e tangente ao lugar geométrico instantâneo (Figura 3), sendo considerado válido só o círculo de Mohr, com o ponto P situado a abaixo da reta. A tensão principal máxima σ_1 , é definida pelo ponto maior de intersecção do círculo de Mohr com o eixo σ_m .

2.4.5. Tensão incondfinada (σ_c)

Ela é encontrada através da reta que sai da origem e tangência a reta do lugar geométrico instantâneo. O ponto máximo de intersecção do círculo de Mohr com o eixo σ determina a resistência incondfinada (σ_c) do produto.

2.4.6. Efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)

O efetivo ângulo de atrito interno relaciona-se da mesma forma que o ângulo de atrito interno, com o conhecimento da LG. Por sua vez, a reta que une o ponto de tangência do lugar geométrico com o semicírculo de Mohr de maior tensão e a origem da coordenada forma o

ângulo que é denominado de efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e). Ou seja, o efetivo ângulo de atrito interno foi obtido a partir da reta que parte da origem e, tangência o primeiro Semicírculo de Mohr.

O Coeficiente angular do lugar geométrico é o ângulo de atrito interno ϕ_e . A linha reta, passando através da origem e do ponto de tangência do círculo de Mohr da tensão principal máxima σ_m , define o efetivo lugar geométrico (ELGD). O Coeficiente angular do efetivo lugar geométrico é o efetivo ângulo de atrito interno ϕ_e , como mostra a Figura 2.

2.4.7. Função Fluxo (FF)

Conforme descreve Lopes Neto & Nascimento (2013) outra variável de grande relevância para a compreensão do comportamento de produtos em silos, é a chamada função fluxo (FF). Lopes Neto & Nascimento (2009a) comentam que a função fluxo (FF) serve para estimar a capacidade dos sólidos em fluir por gravidade.

Trata-se de uma propriedade que apresenta uma relação direta entre a tensão principal máxima e tensão não-confinada, tem-se que:

$$\text{Função Fluxo} = \frac{\text{Tensão Normal max.principal}}{\text{Tensão Normal incondfinada}} \quad (8)$$

Esta função fluxo permite a qualificação do comportamento de fluxo dos produtos armazenados. Jenike (1964) classifica os produtos de acordo com sua função limite de fluxo (FF), como segue:

Tabela 2. Limite de FF

LIMITE DA FF	Classificação quanto ao fluxo
FF < 2	Muito coesivo
2 < FF < 4	Coesivo
4 < FF < 10	Fluxo fácil
FF > 10	Fluxo livre

Portanto, quanto maior a Função Fluxo maior é a facilidade de fluidez do produto armazenado.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização do experimento

A pesquisa e os ensaios foram realizados no Laboratório de Construções Rurais e Ambientais - LaCRA, da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola do Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Federal de Campina Grande - PB. O desenvolvimento do equipamento foi realizado em oficina própria, Sítio na localidade do Imbé, São Sebastião de Lagoa de Roça - PB.

3.2. Materiais

Os materiais utilizados durante o desenvolvimento do trabalho estão relacionados na Tabela 3.

Tabela 3. Equipamentos utilizados no projeto

Material/Equipamento	Quantidade
Arduino Mega 2560	1
Fonte Chaveada 24 V 20A 480 w	1
Display Touch Screen 7"	1
Motor de passo NEMA 34	2
Controlador do motor de passo DIV268N-5 ^a	2
Célula de carga 20 kg	2
Módulo amplificador HX711	2
Regulador de tensão DC/DC LM25963A	2
Conversor de Nível lógico 5 V-3.3V	1
Cartão de memória 32GB Micro Sd	1

Adaptador USB - Serial TTL PL2303HX	1
Drive Ponte H L298N	1
Motor DC 3A 6 V	1
Disco Encoder ABS20	1
Sensor Óptico TCST2103	3
Sensor DHT22-PCB	1
Placa de Circuito Universal 7x9 cm 780 furos	2
Blocos cilíndricos de nylon	3
Barras de aço	3
Barras de alumínio	3
Cantoneira de alumínio	1
Bloco de compensado 2 mm	1
Massa acrílica galão	1
Aparelho galão	1
Tinta azul litro	1
Tinta cinza litro	1
Solvente diverso litro	4
Acelerador de secagem	1
Lixas	Diversas
Parafusos	Diversos
Porcas e arruelas	Diversas
Conduites	Diversos
Conexões (cabos e fios)	Necessários

3.3 Métodos

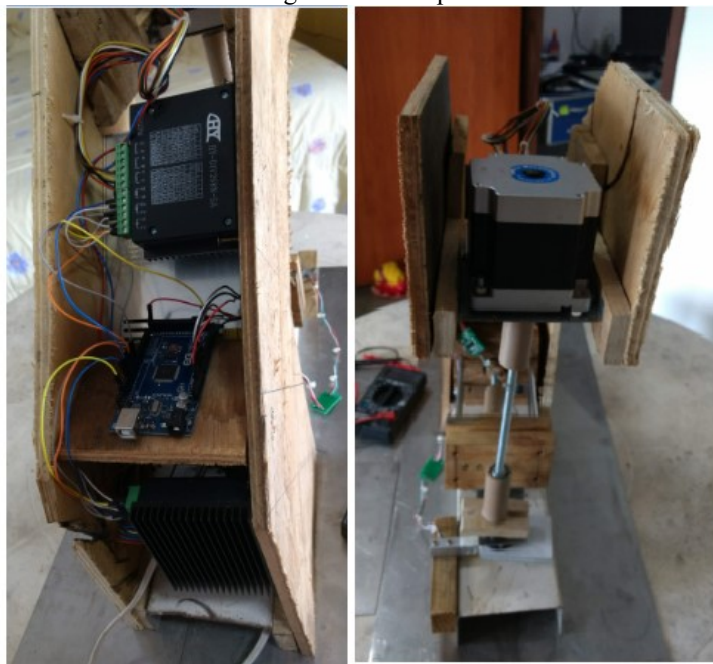
A primeira fase do projeto foi o estudo detalhado do funcionamento do TSG 70-140 (Fig. 5), com base nesse estudo foi realizado o dimensionamento eletrônico e mecânico para um primeiro protótipo (Fig. 6), onde foram testadas as teorias para o funcionamento do equipamento. Com base nesses testes o desenvolvimento do equipamento foi dividido em: tração, compressão, controle e aquisição de dados, gabinete do equipamento e testes de comparação com a TSG 70-140.

Figura 3. TSG 70-140



Fonte: Próprio autor (2018)

Figura 4. Protótipo



Fonte: Próprio autor (2018)

Em cada etapa do desenvolvimento foram usinadas as partes mecânicas, montadas e ligadas às partes eletrônicas e realizada a programação. Após a montagem das partes de tração e compressão, foram realizados testes de funcionamento em separado para após seguir para união das partes e os testes em conjunto.

Feita a união das duas primeiras partes iniciou-se a programação do sistema de controle e aquisição de dados e a programação do display touchscreen. Foi colocado em funcionamento o equipamento para os testes iniciais.

Durante os teste iniciais foi construído o gabinete, que é a estrutura de suporte do equipamento. Realizado os últimos ajustes antes de trazer o equipamento para o LaCRA e iniciar os testes de comparação com o TSG 70-140.

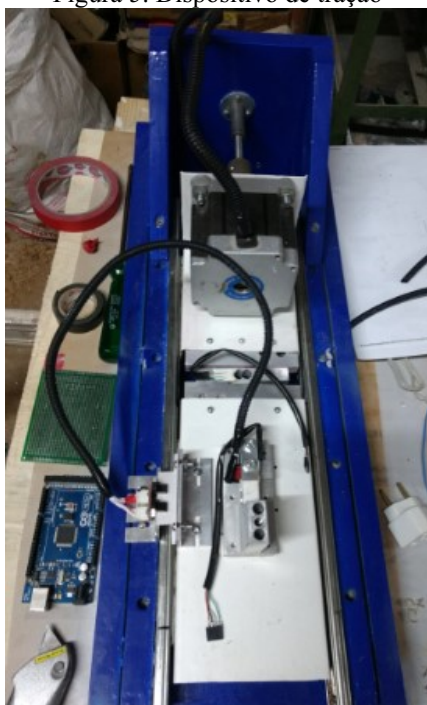
Para os testes foram escolhidos três produtos: farinha de mandioca fina, painço e milho em grão. Serão executados ensaios em paralelo: no TSG 70-140 e no equipamento que Eu desenvolvi, realizando três repetições com cada amostra de produto.

4. DESENVOLVIMENTO

4.1. Dispositivo de tração

Com a finalidade de medir a força de cisalhamento foi utilizado um motor de passo que está ligado a uma célula de carga que vai medir a força de cisalhamento quando a célula de cisalhamento for tracionada pelo motor (Fig. 5). O motor foi programado para tracionar a base da célula de cisalhamento (Fig. 6) por 5 mm para medir o pré-cisalhamento e o cisalhamento da amostra a ser ensaiada.

Figura 5. Dispositivo de tração



Fonte: Próprio autor (2018)

Figura 6. Suporte da base da célula de cisalhamento

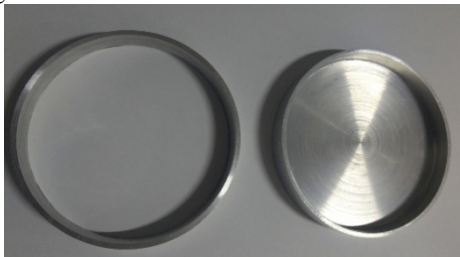


Fonte: Próprio autor (2018)

Foram feitas as bases e suporte para o motor de passo, o acoplamento do motor com o eixo de tração, os suportes de ligação da célula de carga com o motor e a base da célula de cisalhamento. Foram usinados o suporte onde foi colocada a célula de carga responsável por medir a força normal aplicada ao produto e a base de suporte para a célula de cisalhamento.

Foram usinados também nessa fase a base do anel de cisalhamento e o anel de cisalhamento (Fig. 7).

Figura 7. Base e o anel da célula de cisalhamento



Fonte: Próprio autor (2018)

Na parte de programação o sinal medido na célula de carga é amplificado e convertido pelo módulo HX711 é lido pelo Arduino e disponibilizado para plotagem no gráfico da tela touchscreen, armazenado na tabela gerada e salva no cartão de memória com a extensão “.csv”.

4.2. Dispositivo de compressão

O dispositivo de compressão (Fig. 8) tem a finalidade de aplicar a força normal ao produto, ele está ligado a um motor de passo que vai aplicar a força normal na tampa da célula de cisalhamento no momento do ensaio.

Figura 8. Dispositivo de compressão



Fonte: Próprio autor (2018)

No mesmo eixo do dispositivo de compressão foi acoplado um dispositivo de torção para aplicar as torções e obter a consolidação do produto a ser ensaiado (Fig. 9). As torções são aplicadas por meio de um motor DC, que realiza o movimento de 180° para realizar uma torção.

Figura 9. Dispositivo de torção

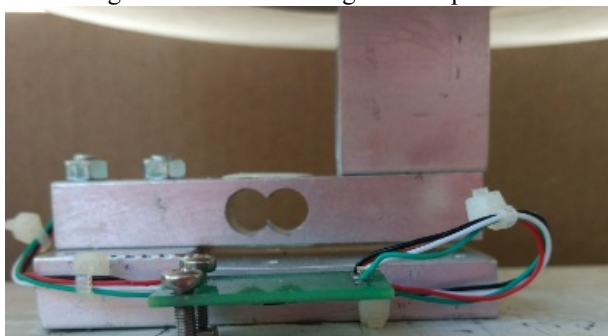


Fonte: Próprio autor (2018)

Para o dispositivo de compressão foi usinado o acoplamento do eixo do motor com a barra roscada, na barra guia foi feito o rasgo da chaveta para manter o alinhamento do eixo, na extremidade superior um furo com rosca interna para acoplar na barra roscada e na extremidade inferior foi aberta um rosca para fixar o dispositivo de torção.

Na parte eletrônica o motor de passo é programado para aplicar a força normal que é medida a cada torção, e corrigida a cada torção aplicada, as leituras são feitas pela célula de carga que foi colocada abaixo da base da célula de cisalhamento (Fig. 10) e enviada para o programa que compara com a carga aplicada e faz a correção. Após o encerramento das torções, a carga e o número de torções aplicadas são gravados no arquivo gerado e podem ser salvados no cartão de memória.

Figura 10. Célula de carga da compressão



Fonte: Próprio autor (2018)

Nessa mesma etapa foi usinada a tampa da célula de cisalhamento e o molde utilizado na consolidação (Fig. 11). O dispositivo utiliza a mesma tampa para as etapas de consolidação e cisalhamento do produto.

Figura 11. Tampa da célula de cisalhamento e molde de consolidação



Fonte: Próprio autor (2018)

4.3. Controle e aquisição de dados

Para o controle e visualização das etapas foi utilizado um display touchscreen 7” (Fig. 12) que funciona como dispositivo de entrada e plataforma de acompanhamento do ensaio. Nele foi programada oito telas:

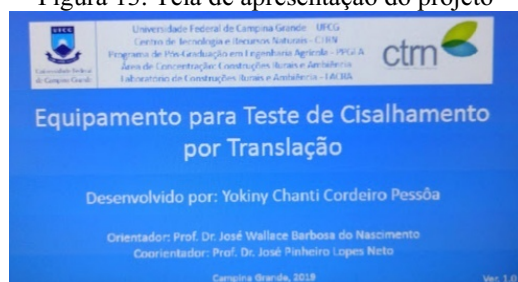
Figura 12. Display touchscreen 7”



Fonte: Próprio autor (2018)

- A primeira: uma tela de apresentação do projeto;

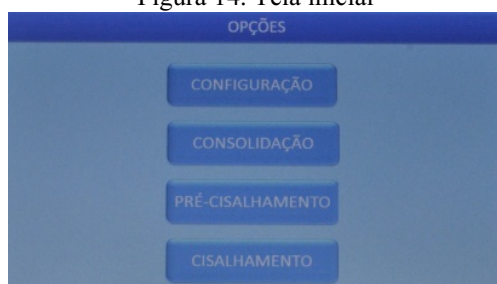
Figura 13. Tela de apresentação do projeto



Fonte: Próprio autor (2018)

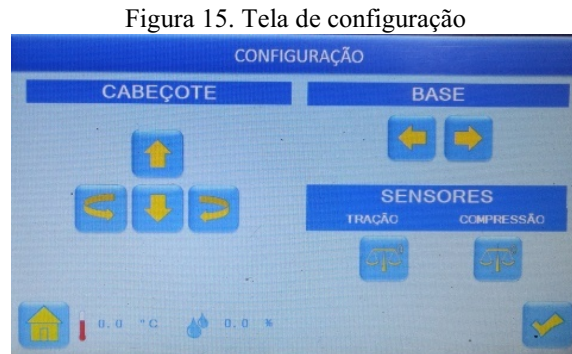
- A segunda: a tela inicial, com os botões de configuração, consolidação, pré-cisalhamento e cisalhamento;

Figura 14. Tela inicial



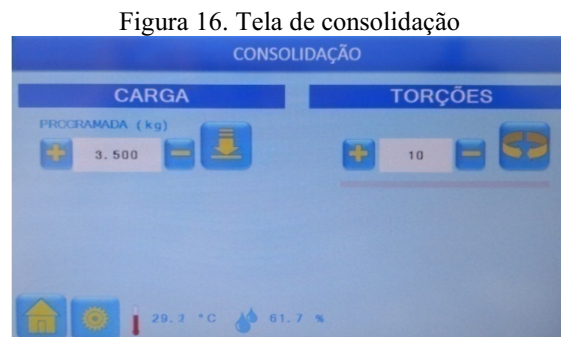
Fonte: Próprio autor (2018)

- A terceira: a tela de configuração, onde são realizadas as calibrações das células de tração e compressão, subir e baixar o dispositivo de compressão e movimentar o dispositivo de torções e a base. Nessa tela já está disponível a leitura de temperatura e umidade da sala onde está sendo realizado o ensaio;



Fonte: Próprio autor (2018)

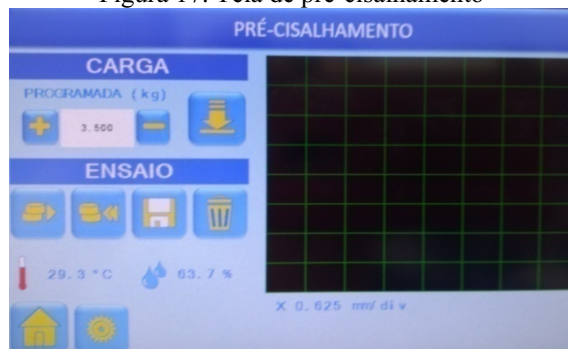
- A quarta: a tela de consolidação, nessa tela é informada a força normal a ser aplicada e o número de torções desejadas. Nessa tela também está disponível a leitura de temperatura e umidade da sala onde está sendo realizado o ensaio.



Fonte: Próprio autor (2018)

- A quinta: a tela de pré-cisalhamento, nessa tela entramos com o valor da força normal (a mesma utilizada na consolidação), temos o botão para início do ensaio, botão de retorno do dispositivo de tração, botão para salvar os dados, botão da lixeira e a tela para acompanhar o gráfico durante a realização do ensaio. Nessa tela também está disponível a leitura de temperatura e umidade da sala onde está sendo realizado o ensaio.

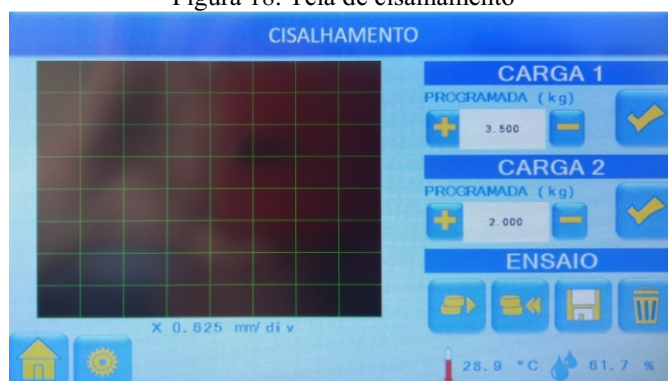
Figura 17. Tela de pré-cisalhamento



Fonte: Próprio autor (2018)

- A sexta: a tela de cisalhamento, nessa tela é colocado os valores da tensão normal inicial (Tensão normal de pré-cisalhamento) e a tensão normal secundária (Tensão normal de cisalhamento). Temos o botão para início do ensaio, botão de retorno do dispositivo de tração, botão para salvar os dados, botão da lixeira e a tela para acompanhar o gráfico durante a realização do ensaio. Nessa tela também está disponível a leitura de temperatura e umidade da sala onde está sendo realizado o ensaio.

Figura 18. Tela de cisalhamento

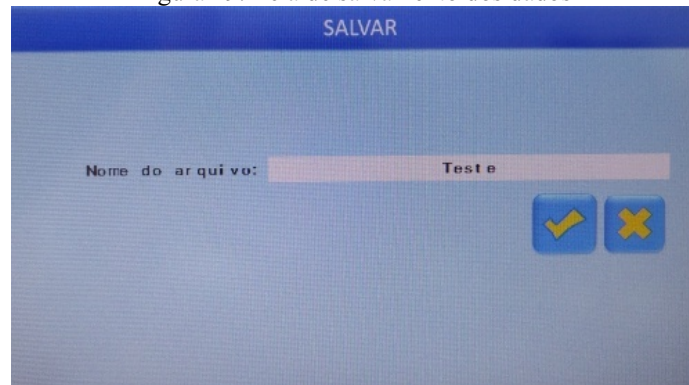


Fonte: Próprio autor (2018)

- A sétima: a tela de salvamento dos dados, ela pode ser acessada durante o pré-cisalhamento e o cisalhamento. Nesta tela podemos colocar o nome no arquivo que será gravado com a extensão “.csv”, que permite ser aberta em diversos programas que trabalhe com tabelas e tratamento de dados. No

mesmo arquivo são salvos todos os dados, desde a consolidação até o cisalhamento.

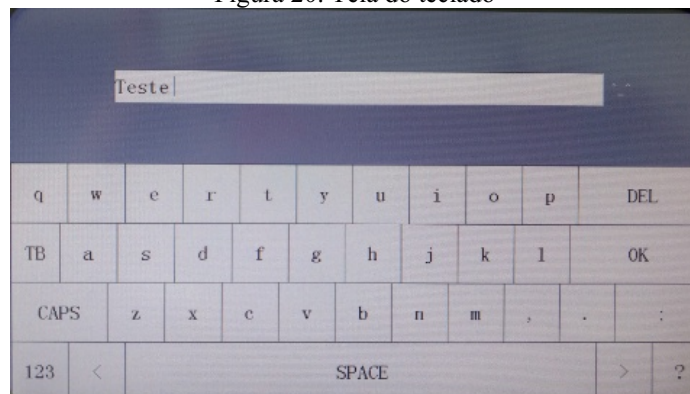
Figura 19. Tela de salvamento dos dados



Fonte: Próprio autor (2018)

- A oitava: a tela do teclado é o local onde se coloca o nome do arquivo.

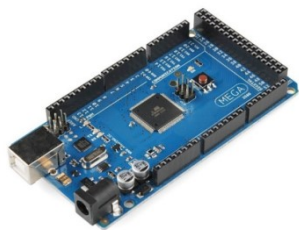
Figura 20. Tela do teclado



Fonte: Próprio autor (2018)

A interface entre o display touchscreen e a parte mecânica é realizada através de um Arduino Mega, onde cada botão e função do display foram programados para realizar a rotina referente à sua função, cabendo ao Arduino Mega (Fig. 23) controlar as partes mecânicas e salvar os dados referentes ao ensaio em um cartão Sd.

Figura 21. Arduino Mega 2560



Fonte: Próprio autor (2018)

O circuito de alimentação do equipamento é composto por uma fonte chaveada de 24v e 20, um módulo regulador 9v para alimentar os controladores dos motores de passo, um módulo regulador 5v para alimentar o display touchscreen e um módulo regulador 5v que alimenta o drive da ponte H.

4.4. Gabinete do equipamento

Após a execução das etapas anteriores foi feito com placas de compensado a estrutura de suporte do equipamento (Fig. 22), as peças foram cortadas na serra de bancada, depois foi utilizados barras de madeira maciça para fazer o suporte para a estrutura. Tudo foi montado com a utilização de parafusos, as arestas foram boleadas com uma tupia manual, depois foi lixado e aplicada 5 demãos de massa acrílica com lixamento entre cada demão (Fig. 23), duas demãos de prime com lixamento entre as demãos (Fig. 24), foi aplicada 3 demãos da tinta cinza em todo o equipamento (Fig. 25), foi colocada a fita para delimitar a área da pintura azul e isolada toda a parte cinza para ser aplicada 3 demãos de tinta azul (Fig. 26) e foi colado um revestimento no fundo do equipamento para evitar o atrito com a superfície de apoio onde o equipamento será colocado.

Figura 22. Gabinete do equipamento



Fonte: Próprio autor (2018)

Figura 23.Preparação da superfície do gabinete



Fonte: Próprio autor (2018)

Figura 24.Aplicação do prime



Fonte: Próprio autor (2018)

Figura 25.Aplicação da tinta cinza



Fonte: Próprio autor (2018)

Figura 26. Aplicação da tinta azul



Fonte: Próprio autor (2018)

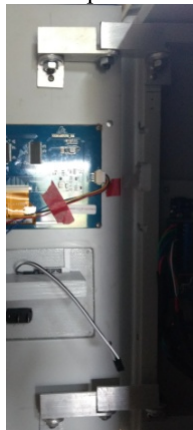
Com a finalização do gabinete, todas as partes: mecânicas, eletrônicas, os fios e conexões foram colocados (Fig. 29). Foi feito um suporte para abertura da tampa frontal (Fig. 30), foi colocado o display, o sensor DHT, o leitor de cartão de memória e o botão de liga e desliga (Fig.30).

Figura 27. Montagem



Fonte: Próprio autor (2018)

Figura 28. Suporte da tampa



Fonte: Próprio autor (2018)

Figura 29.Painel frontal



Fonte: Próprio autor (2018)

Com o equipamento todo montado foram realizados os testes iniciais para ajustes das partes mecânicas e correções na programação do equipamento.

Após essa etapa o equipamento foi embalado (Fig. 30) e levado para o LaCRA para serem realizados os ensaios de comparação com o TSG 70-140.

Figura 30.Equipamento embalado



Fonte: Próprio autor (2018)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram utilizados para realização dos ensaios três produtos: farinha de mandioca fina, painço e milho em grão, com a finalidade de avaliar o equipamento com produtos de comportamentos distintos. Em todos os ensaios realizados utilizaram-se produtos de mesma procedência.

A otimização das amostras para a escolha da carga normal e número de rotações foi feita através de testes preliminares na TSG 70-140 para que a comparação entre os ensaios nos dois equipamentos fosse feita. Foi definido que seriam realizadas 3 repetições para cada amostra de material.

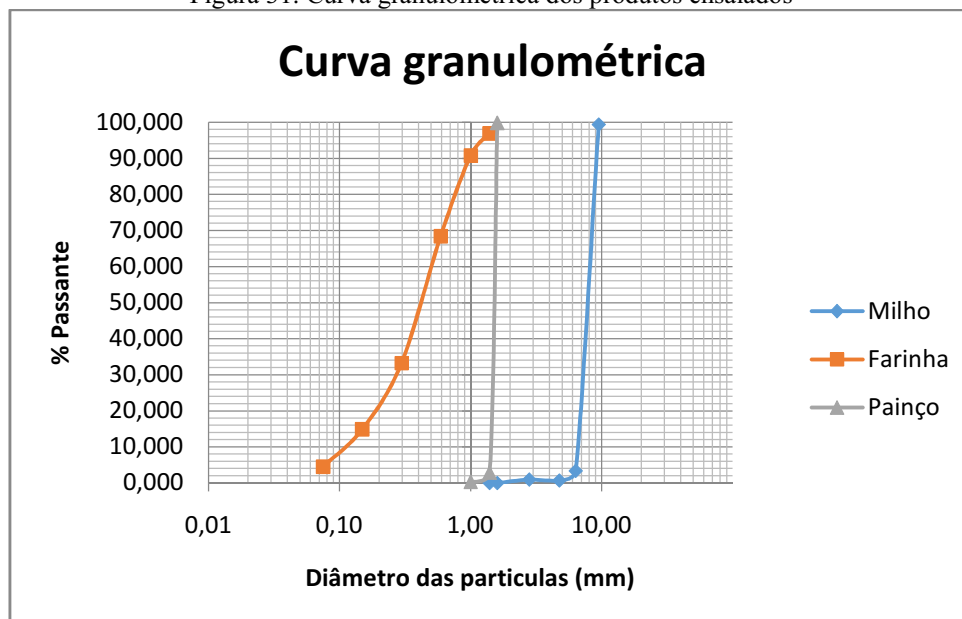
5.1. Propriedades físicas dos produtos ensaiados

5.1.1 Granulometria e teor de umidade

A determinação da granulometria foi realizada utilizando-se o método de peneiramento, com amostra previamente pesada (500g) e peneirada em jogo de peneiras padrão ABNT durante 5 minutos. Ao término do peneiramento, pesou-se a quantidade de produto retido em cada peneira determinando-se, assim, a percentagem final retida.

A Figura 31 apresenta as análises granulométricas para os produtos farinha de mandioca, painço e milho.

Figura 31. Curva granulométrica dos produtos ensaiados



Fonte: Próprio autor (2018)

Através dos ensaios de granulometria e com base em Calil Jr. (1984) conforme a Tabela 1, observou-se que para a farinha de mandioca que o maior percentual de material retido foi entre $0,420 \text{ mm} < D < 0,149 \text{ mm}$, classificando o produto como pulverulento coesivo. Para o painço e o milho o ensaio de granulometria mostrou que o material retido ficou acima de $0,42 \text{ mm}$, classificando esses produtos como granulares.

De acordo com o ensaio para determinar o teor de umidade utilizado o método da estufa, os produtos, farinha de mandioca, painço e milho apresentaram respectivamente, 2.10%, 2.99% e 12.59% de umidades no dia dos ensaios.

5.2. Propriedades de fluxo dos produtos estudados

Para determinar as propriedades de fluxo dos produtos para cisalhamento instantâneo foi utilizadas a metodologia sugerida por Milani (1993) e o Manual de operação do TSG 70-140 (Operating Instructions for Translational Shear Cell). Os equipamentos utilizados nos ensaios foram: o Aparelho de Cisalhamento Direto por Translação TSG 70-140 fabricado pela empresa AVT e a Máquina de Cisalhamento Direto por Translação (MCDT) desenvolvido nesse trabalho, ambos com base no aparelho de cisalhamento de Jenike (Jenike Shear Cell).

Para a obtenção do peso específico consolidado foi utilizado o anel de cisalhamento de 63 mm de diâmetro, sendo aplicadas 20 torções para farinha de mandioca e milho, e 25 torções para o painço.

Nas Tabelas 4 e 5 estão descritos os níveis de cargas utilizados no pré-cisalhamento e cisalhamento para determinação das propriedades de fluxo dos produtos ensaiados nas duas máquinas.

Tabela 4. Níveis de carga utilizados nos ensaios de farinha de mandioca

Carga de pré-cisalhamento (kg)	Cargas de cisalhamento (kg)	Número de repetições
5	3,5	3
	2	
	1	
3,5	2	3
	1	
	0,7	
2	1	3
	0,7	
	0,5	

Tabela 5. Níveis de carga utilizados nos ensaios do painço e milho em grão

Carga de pré-cisalhamento (kg)	Cargas de cisalhamento (kg)	Número de repetições
7	5	3
	3,5	
	2	
5	3,5	3
	2	
	1	
3,5	2	3
	1	
	0,7	

Amostras de cada produto foram submetidas aos ensaios em ambas as máquinas. Após a obtenção da consolidação crítica de cada amostra, as amostras foram ensaiadas e os dados obtidos nos ensaios foram utilizados no programa AutoCAD, para gerar os gráficos de tensão normal (σ) versus tensão de cisalhamento (τ), utilizando os círculos de Mohr (Ver Figura 2) para obtenção dos ângulos de atrito interno (ϕ_i), ângulo efetivo de atrito interno (ϕ_e), a tensão máxima de consolidação (σ_m), tensão inconfínada (σ_c), a coesão (c) e para determinar o Lugar Geométrico de Deslizamento (LGD) o Efetivo Lugar Geométrico de Deslizamento (ELGD).

Nas Tabelas 6 e 7 temos os resultados obtidos para os limites inferior e superior do peso específico consolidado (γ), ângulo de atrito interno (ϕ_i) e efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e).

Nas Tabelas 8 e 9 temos os resultados obtidos para a coesão (c), tensão máxima de consolidação (σ_m), tensão inconfínada (σ_c) e da função fluxo (FF).

Tabela 6. Resultados obtidos nos ensaios de propriedades TSG 70-140

Produto	Peso específico (γ) kN/m ³		Ângulo de atrito interno (ϕ_i)		Efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
Farinha de mandioca	8,140	8,618	36°	41°	38°	43°
Painço	7,433	7,675	18°	21°	20°	21°
Milho	7,761	8,255	20°	27°	21°	27°

Tabela 7. Resultados obtidos nos ensaios de propriedades MCDT

Produto	Peso específico (γ) kN/m ³		Ângulo de atrito interno (ϕ_i)		Efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
Farinha de mandioca	8,075	8,635	26°	40°	45°	68°
Painço	7,397	7,737	19°	30°	24°	35°
Milho	7,380	7,910	19°	36°	25°	40°

Tabela 8. Resultados obtidos nos ensaios de propriedades TSG 70-140

Produto	Coesão	Tensão máxima de consolidação (σ_m)	Tensão inconfina da (σ_c)	Função fluxo (FF)
	Média	Média	Média	
Farinha de mandioca	213	10682,84	875,45	12,20
Painço	170,78	11498,40	477,09	24,10
Milho	169,11	11995,86	508,49	23,59

Tabela 7. Resultados obtidos nos ensaios de propriedades MCDT

Produto	Coesão	Tensão máxima de consolidação (σ_m)	Tensão inconfina da (σ_c)	Função fluxo (FF)
	Média	Média	Média	
Farinha de mandioca	1707,56	10939,30	6387,23	1,71
Painço	758,75	12884,05	2365,03	5,45
Milho	757,75	12185,63	2393,50	5,09

5.2.1. Peso específico consolidado (γ)

Comparando os resultados, nas tabelas 6 e 7, entre os dois equipamentos o peso específico (γ) obteve resultados semelhantes, para todos os produtos, levando-se em consideração a média. O peso específico é calculado pela divisão da massa específica do produto pelo volume da célula e multiplicado pela força da gravidade. Sendo a diferença do volume entre as células pequena, os resultados foram bem próximos.

Para a farinha de mandioca, Costa (2013) nos seus ensaios, obteve valores mais baixos para o peso específico consolidado (γ), 7097,12 e 7362,54 N.m⁻³, valores que correspondem

ao limite inferior e superior, respectivamente. O mesmo aconteceu com Mota (2017), onde os valores para o peso específico consolidado (γ) foi 7,0 e 7,07 kN/m³, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. A diferença entre os valores de peso específico (γ) encontrados foi em decorrência da diferença na distribuição granulométrica entre as farinhas e do teor de umidade entre os produtos ensaiados, o produto utilizado no nosso ensaio apresentou uma concentração maior na peneira de 0,297 mm e a umidade mais baixa entre todos.

Para o painço Mota (2017) obteve valores para o peso específico (γ) mais baixos aos obtidos neste trabalho, 6,07 e 6,36 kN/m³, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. Batista (2009) em seu trabalho obteve valor médio para o peso específico consolidado (γ) mais próximo aos obtidos neste trabalho, 7,8 kN/m³. Indicando que a distribuição granulométrica obtida por foi semelhante ao nosso ensaio infelizmente não foi possível comparar a umidade por falta da disponibilidade deste dado.

Para o milho em grão Anjos (2018) obteve valores para o peso específico (γ) mais próximo aos obtidos neste trabalho, 7,5 e 7,54 kN.m⁻³, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. Anjos (2018) não disponibilizou na sua tese os dados referentes a umidade e granulometria. Meira (2019) em seu trabalho obteve valores mais baixos para o peso específico (γ) aos obtidos neste trabalho, 6,5 e 7 kN/m³. O teor de umidade encontrado por Meira (2019) foi de 12,5%, teor dentro da faixa de umidade para comercialização desse grão.

5.2.2. Ângulo de atrito interno (ϕ_i)

Para o ângulo de atrito interno (ϕ_i) a comparação entre os valores obtidos nos dois equipamentos, TSG 70-140 e MCDT, apresentaram variações grandes.

Para a farinha de mandioca os valores do ângulo de atrito interno (ϕ_i) na TSG 70-140 foram 36° e 41°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. Na MCDT os valores do ângulo de atrito interno (ϕ_i) foram 26° e 40°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. O ângulo de atrito interno (ϕ_i) obtido por Mota (2017) teve valores mais baixos, 17° e 28°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. Costa (2013) obteve valores mais próximos aos da MCDT, 27° e 34°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente.

Para o painço os valores do ângulo de atrito interno (ϕ_i) na TSG 70-140 foram 18° e 21°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. Na MCDT os

valores do ângulo de atrito interno (\emptyset_i) foram 19° e 30°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. Mota (2017) obteve valores muito abaixo para ângulo de atrito interno (\emptyset_i), 10° e 20°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. Batista (2009) obteve valores mais próximos da MCDT, 24,3° e 24,69°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente.

Para o milho em grão os valores do ângulo de atrito interno (\emptyset_i) na TSG 70-140 foram 20° e 27°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. Na MCDT os valores do ângulo de atrito interno (\emptyset_i) foram 19° e 36°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. O ângulo de atrito interno (\emptyset_i) obtido por Anjos (2018) foi próximo ao obtido na TSG 70-140, 19° e 28°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. Meira (2019) obteve valores para o ângulo de atrito interno (\emptyset_i) com valores mais baixos aos obtidos nos demais trabalhos, 11,8° e 20°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente.

5.2.3. Efetivo ângulo de atrito interno (\emptyset_e)

Para o efetivo ângulo de atrito interno (\emptyset_e) a comparação entre os valores obtidos nos dois equipamentos, TSG 70-140 e MCDT, também apresentaram variações grandes.

Para a farinha de mandioca os valores do efetivo ângulo de atrito interno (\emptyset_e) na TSG 70-140 foram 38° e 43°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. Na MCDT os valores do efetivo ângulo de atrito interno (\emptyset_e) foram 45° e 68°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. Costa (2013) obteve para este mesmo produto valores, aproximam-se mais dos valores da TSG 70-140, 32° e 40°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. Mota (2017) obteve para o efetivo ângulo de atrito interno (\emptyset_e) mais baixo que os encontrados nos demais ensaios, 20° e 28°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente.

Para o painço os valores do efetivo ângulo de atrito interno (\emptyset_e) na TSG 70-140 foram 20° e 21°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. Na MCDT os valores do efetivo ângulo de atrito interno (\emptyset_e) foram 24° e 35°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. Batista (2009) obteve valores para o efetivo ângulo de atrito interno (\emptyset_e) se próxima aos encontrados no MCDT, 24,9° e 25,45°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. Mota (2017) obteve valores relativamente mais baixos para o efetivo ângulo de atrito interno (\emptyset_e), 14° e 16°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente.

Para o milho em grão os valores do efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) na TSG 70-140 foram 21° e 27°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. Na MCDT os valores do efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) foram 25° e 40°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. Em seu trabalho Anjos (2018) obteve valores para o efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) que se aproximam mais dos valores encontrados na MCDT, 25° e 32,5°, valores que correspondem ao limite inferior e superior, respectivamente. Meira (2019) obteve em seus ensaios valores para o efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) que são mais próximos dos obtidos no ensaio com a TSG 70-140.

5.2.4. Coesão (c)

Para a farinha de mandioca o valor médio da coesão (c) na TSG 70-140 foi 213 Pa. Na MCDT o valor médio da coesão (c) foi 1707,56 Pa. Costa (2013) obteve valor médio da coesão (c) de 1456 Pa, mais próximo ao da MCDT. Mota (2017) obteve valor médio da coesão (c) de 480 Pa, mais próximo ao TSG 70-140.

Para o painço o valor médio da coesão (c) na TSG 70-140 foi 170,78 Pa. Na MCDT o valor médio da coesão (c) foi 758,75 Pa. Mota (2017) obteve valor médio da coesão (c) de 120 Pa.

Para o milho em grão o valor médio da coesão (c) na TSG 70-140 foi 169,11 Pa. Na MCDT o valor médio da coesão (c) foi 757,75 Pa. Anjos (2018) obteve valor médio da coesão (c) superior aos encontrados, 1300 Pa. Meira (2019) obteve valor médio da coesão (c) de 362,44 Pa.

5.2.5. Função fluxo

Para a farinha de mandioca a função fluxo (FF) na TSG 70-140 foi de 12,20, indicando fluxo livre. Na MCDT a função fluxo (FF) foi de 1,71 indicando fluxo muito coesivo. Costa (2013) encontrou um índice de fluxo (ffc) de 4,6, indicando um fluxo fácil. Mota (2017) nos seus ensaios encontrou um índice de fluxo (ff) de 2,11, indicando um fluxo coesivo.

Para o painço a função fluxo (FF) na TSG 70-140 foi de 24,10, indicando fluxo livre. Na MCDT a função fluxo (FF) foi de 5,45 indicando fluxo fácil. Mota (2017) nos seus

ensaios encontrou um índice de fluxo (ff) 4,44, indicando fluxo fácil. Batista (2009) não apresentou a função fluxo (FF) ou índice de fluxo (ff).

Para o milho em grão a função fluxo (FF) na TSG 70-140 foi de 23,59, indicando fluxo livre. Na MCDT a função fluxo (FF) foi de 5,09, um indicando fluxo fácil. Anjos (2018) e Meira (2019) em seus trabalhos não apresentaram os a função fluxo (FF) ou índice de fluxo (ff).

6. CONCLUSÕES

Quando comparados os ensaios realizados entre a TSG 70-140 e a MCDT os resultados apresentaram discrepância, essa variação foi decorrente de duas situações:

- Em decorrência da determinação do número de rotações para consolidação crítica ter sido feita apenas no TSG 70-140 e aplicada na metodologia dos ensaios para os dois equipamentos, durante os ensaios foi percebido que a MCDT necessitava de um número maior de rotações para alcançar a consolidação ótima;
- Foi constatado que o motor DC utilizado na MCDT para aplicar as torções não tinha força suficiente para manter a velocidade das rotações para as tensões de pré-cisalhamento mais altas.

O equipamento necessita de ajustes mecânicos e adequações de programação para melhorar o desempenho e alcançar a sua funcionalidade, mas demonstrou capacidade para atingir as metas proposta e potencial de ampliação da sua funcionalidade.

Após as modificações faz-se necessário um número maior de repetições de ensaios que tornem possível comprovar estatisticamente a qualidade e confiabilidade dos dados.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros:

- Modificar o motor responsável pelas torções, para melhorar a eficiência da obtenção da consolidação crítica dos materiais;
- Modificar o suporte que fixa o anel de cisalhamento, permitindo que seja utilizado o suporte para os ensaios de parede;
- Ampliar as funções do equipamento, adicionando os parâmetros de compressibilidade e a dilatância;
- Permitir que o equipamento seja conectado a internet;
- Automatizar a interpretação e análise dos dados, evitando a interferência do operador no resultado do ensaio;
- Propor um novo diâmetro de célula de cisalhamento capaz de realizar o ensaio independente da classificação do produto quanto a sua densidade ou granulometria;

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANJOS, C. M. dos. **Simulação numérica das pressões exercidas pelos grãos nas paredes dos silos verticais pelo método dos elementos finitos.** 2018. 133p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande.

BATISTA, C. S. **Estudo teórico e experimental do fluxo de sólidos particulares em silos verticais.** Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2009.

CALIL JR, C., Cheung, A. B. **Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo.** Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2007.

CHEUNG, A. B.; CALIL JUNIOR, C.; BERTOCINI, S. R. **Investigação Estrutural de Silos Metálicos e de Concreto no Brasil.** Compat 2015. Lisboa, 2015.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos, Safra 2017/2018. Quinto levantamento, Outubro de 2018.** Disponível em: Acesso em: 20 outubro 2018.

COSTA, C. A. **Propriedades físicas, mecânicas e de fluxo de produtos agroindustriais.** 2013. 140p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande.

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

ISO 11697. **Bases for design of structures: Loads due to bulk materials**. International Organization for Standardization, London, 2012.

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

LOPES NETO, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B. do; SILVA, V. R. da; LOPES, F. F. M. **Propriedade de fluxo e característica de escoabilidade de rações avícolas para dimensionamento de silos**. Revista Ciências e Agrotecnologia, v.31, p.851-859, 2007.

LOPES NETO, J. P.; SILVA, V. R. da; NASCIMENTO, J. W. B. do. **Propriedades de fluxo de produtos pulverulentos alimentícios**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.13, p.634-644, 2009a.

LOPES NETO, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B. do; SILVA, V. R. da. **Efeito do tempo de armazenamento de rações avícolas no dimensionamento de silos**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.29, p.518-527, 2009b.

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

MEIRA, A. S. **Análise de pressões em paredes lisas de silos cilíndricos verticais**. 2019. 97p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande.

MOTA, E de L. **Análise de fluxo e vazão de três tipos de açúcar, farinha de mandioca e painço em silo vertical**. 2017. 76p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande.

NAKA, S. **Determinação das propriedades físicas dos grãos de mamona ‘guarani’ visando armazenagem em silos verticais.** Universidade Estadual de Campinas – SP, 2010.

SCHULZE, D. **Powders and bulk solids.** Behavior, characterization, storage and flow. 1.ed. Berlin: Springer, 2009. 517p.

TEXEIRA, L. G. R. **Determinação das propriedades físicas e de fluxo do café para projeto estrutural de silos e equipamentos.** Universidade Federal de Lavras - UFLA, Lavras – MG, 2006.