



UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

MARIANA DE OLIVEIRA E SILVA

**Análise das propriedades físicas e de fluxo de café
torrado no processo de encapsulamento**

LAVRAS-MG
2018

MARIANA DE OLIVEIRA E SILVA

**Análise das propriedades físicas e de fluxo de café
torrado no processo de encapsulamento**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções, Ambiente e Tratamento de Resíduos, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes

Orientador

LAVRAS – MG

2018

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Mariana de Oliveira e.

Análise das propriedades físicas e de fluxo de café torrado no
processo de encapsulamento / Mariana de Oliveira e Silva. - 2018.
100 p.

Orientador(a): Francisco Carlos Gomes.

.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2018.
Bibliografia.

1. Cápsula. 2. Jenike Shear Cell. 3. Powder Flow Tester. I.
Gomes, Francisco Carlos. . II. Título.

MARIANA DE OLIVEIRA E SILVA

**Análise das propriedades físicas e de fluxo de café
torrado no processo de encapsulamento**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções, Ambiente e Tratamento de Resíduos, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 14 de junho de 2018.

Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro	UFLA
Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa	UFLA
Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento	UFMG
Dr. Tadayuki Yanagi Júnior	UFLA

Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes
Orientador

LAVRAS – MG

2018

Para Deus e as pessoas que Ele enviou para cuidar de mim

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade concedida para a realização deste trabalho.

A CAPES pela concessão da bolsa de doutorado.

Ao professor Francisco Carlos Gomes pela orientação, paciência e disposição para ajudar.

Ao professor Flávio Meira Borém que carinhosamente disponibilizou recursos para meu projeto.

Ao Laboratório Central de Sementes (LCSEM), com isto incluo funcionários e alunos, que me receberam com cordialidade e contribuíram ricamente para este trabalho.

Ao professor Carlito Calil Júnior e os técnicos do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEN - EESC), pela receptividade e por apoiarem meu projeto.

Ao professor José Wallace Barbosa do Nascimento pelo apoio e disponibilidade, permitindo a realização de ensaios no Laboratório de Construções Rurais e Ambientação (LACRA - UFCG).

Às secretárias do programa, Helem Cristina Carmo e Fernanda Botelho e todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, que contribuíram tanto para a minha formação profissional.

Aos meus amados pais, Maria Inês e Juarez, minha eterna gratidão pela vida, apoio e confiança depositada em meus estudos.

À minha irmã, Ana Consuelo, pela convivência e cumplicidade em todos os momentos da minha vida.

Ao meu marido Guilherme, pelo carinho, amor, atenção e a paciência a mim devotada – em momentos de dúvida sempre pude contar com você ao meu lado.

RESUMO

O processo de encapsulamento apresenta-se como uma forma de agregar valor econômico ao grão de café. É necessário o emprego de estruturas e maquinário devidamente projetados, sendo de fundamental importância o conhecimento das propriedades físicas e de fluxo do produto. Na determinação das propriedades, pode-se utilizar o aparelho “Jenike Shear Cell”, mais tradicional, e o “Powder Flow Tester” (PFT) fruto do avanço tecnológico. O objetivo deste trabalho foi comparar os resultados obtidos pelos dois métodos e verificar a empregabilidade do PFT em substituição ao aparelho de Jenike na determinação das propriedades físicas e de fluxo de café torrado e moído no processo de encapsulamento. Com este intuito, seis amostras foram avaliadas, variando dois graus de torra e três granulometrias em ambos os ensaios de cisalhamento. O PFT forneceu as propriedades físicas e de fluxo, com valores máximos de $35,5^\circ$ para o ângulo de atrito interno e de $46,7^\circ$ para o efetivo ângulo de atrito interno. Com exceção da tensão principal de consolidação, algumas amostras apresentaram valores estatisticamente iguais entre os ensaios com o PFT e o Jenike. Na Função Fluxo os resultados em ambos os ensaios foram idênticos e concluiu-se que não há diferenças estatísticas entre os graus de torra, sendo a granulometria o fator de variação. Dessa forma, a granulometria fina não é indicada para o processo de encapsulamento de café, devido ao fluxo coesivo. No fator K os valores obtidos com o PFT foram menores quando comparados aos de Jenike.

Palavras-chave: Powder Flow Tester, Jenike Shear Cell, Cápsula

ABSTRACT

The encapsulation process is presented as a way of adding economic value to the coffee bean. It is necessary to use structures and machinery properly designed, being of fundamental importance the knowledge of the physical properties and flow of the product. In determining the properties, the "Jenike Shear Cell", more traditional, and the "Powder Flow Tester" (PFT) a fruit of technological advancement. The objective of this work was to compare the results obtained by the two methods and to verify the employability of PFT in replacement of the Jenike apparatus in determining the physical and flow properties of roasted and ground coffee in the encapsulation process. For this purpose, six samples were evaluated, varying two grades of roast and three grades of grinding in both shear tests. The PFT provided the physical and flow properties, with maximum values of 35.5° for the internal friction angle and 46.7° for the effective internal friction angle. With the exception of the main consolidation stress, some samples presented statistically equal values between the PFT and Jenike tests. In the Flow Function, the results in both tests were identical and it was concluded that there are no statistical differences between the roasting classes, with the grinding being the variation factor. Thus, fine grinding is not indicated for the coffee encapsulation process due to the cohesive flow. In the K factor, the values obtained with the PFT were smaller when compared to those of Jenike.

Key words: Powder Flow Tester, Jenike Shear Cell, Cápsula

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Máquina automática de encapsulamento.	24
Figura 2 - Máquina seladora de cápsula manual.	25
Figura 3 - Máquina seladora de cápsula manual e individual.	25
Figura 4 - Principais tipos de fluxo.....	34
Figura 5 - Determinação gráfica do tipo de fluxo.....	35
Figura 6 - Determinação gráfica do tipo de fluxo.....	35
Figura 7 - Exemplo de gráfico para a determinação do fator fluxo.....	37
Figura 8 - Aparelhos utilizados para ensaios de cisalhamento.....	40
Figura 9 - Célula de Jenike na posição inicial off-set.....	42
Figura 10- Aparelho de análise de fluxo de pó (PFT).	43
Figura 11 - Algoritmo de teste de Função de Fluxo.	44
Figura 12 - Algoritmo da Função Fluxo com tempo de consolidação.....	45
Figura 13 - Algoritmo de teste de atrito com a parede.....	46
Figura 14 - Algoritmo do teste de densidade da amostra.....	46
Figura 15. Preparação da amostra, etapas de torra e separação granulométrica.	51
Figura 16 – Aparelho Agtron M-Basic II.....	51
Figura 17 - Aparelho AquaLab.....	52
Figura 18 - Aparelho AquaLab pronto para o teste com a amostra de café torrado e moído.	53
Figura 19 - Célula de Jenike na posição inicial de off-set.	54
Figura 20 - Célula de Jenike na posição final off-set.....	55
Figura 21 - Bancada de consolidação.	56
Figura 22 - Curvas de força-tensão: pré-cisalhamento (τ_p) e cisalhamento (τ_s).	57
Figura 23 - Lugar geométrico mostrando os pontos válidos de cisalhamento.	58
Figura 24 - Lugar geométrico (YL e EYL) e ângulos de atrito interno (ϕ e ϕ_e).	59
Figura 25 - Paredes utilizadas na célula de cisalhamento. (A) Aço liso; (B) Aço rugoso.....	61
Figura 26 - Interface do software utilizado para o cálculo das propriedades.	62
Figura 27 - Interface do software utilizado para o cálculo do ângulo de atrito com a parede.	62
Figura 28 - Aparelho “Powder Flow Tester” do LACRA.....	63
Figura 29 - Bandeja para cisalhamento do produto.	64

Figura 30 - Peças do aparelho “Powder Flow Tester”. (a) Peças que compõem a célula de cisalhamento rotacional. (b) Anel 1 (anel de cisalhamento na opção Função Fluxo); Anel 2 (anel de atrito com a parede).....	64
Figura 31 - Gráfico da atividade de água em função da granulometria dos níveis de torra das amostras.....	67
Figura 32 - Gráfico do ângulo de atrito do produto com a parede versus tensão principal obtido com o “Powder Flow Tester”.	75
Figura 33 - Função Fluxo determinada pelo aparelho “Powder Flow Tester”.....	77
Figura 34 - Fator K em função da granulometria e do grau de torrefação e dos ensaios nos aparelhos “Jenike Shear Cell” e “Powder Flow Tester”.	80
Figura 35 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Jenike Shear Cell” para a torra clara granulometria fina.	92
Figura 36 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Jenike Shear Cell” para a torra clara granulometria média.	92
Figura 37 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Jenike Shear Cell” para a torra clara granulometria grossa.	93
Figura 38 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Jenike Shear Cell” para a torra média granulometria fina.	93
Figura 39 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Jenike Shear Cell” para a torra média granulometria média.	94
Figura 40 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Jenike Shear Cell” para a torra média granulometria grossa.	94
Figura 41 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Powder Flow Tester” para a torra clara granulometria fina.....	95
Figura 42 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Powder Flow Tester” para a torra clara granulometria média.	96
Figura 43 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Powder Flow Tester” para a torra clara granulometria grossa.....	97
Figura 44 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Powder Flow Tester” para a torra média granulometria fina.....	98

Figura 45 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Powder Flow Tester” para a torra média granulometria média.	99
Figura 46 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Powder Flow Tester” para a torra média granulometria grossa.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Formulações para o valor de K sugeridos por diversos pesquisadores.....	38
Tabela 2 - Níveis de cargas normais utilizadas no aparelho “Jenike Shear Cell”.....	60
Tabela 3 - Valores médios de atividade de água em dois níveis de torra e três granulometrias diferentes.	66
Tabela 4 - Propriedades físicas e de fluxo obtidas pelos ensaios no “Jenike Shear Cell”.....	69
Tabela 5 - Propriedades físicas e de fluxo obtidas pelos ensaios no “Powder Flow Tester”.....	69
Tabela 6 - Comparação entre as propriedades físicas e de fluxo obtidas pelos ensaios no "Jenike Shear Cell" e no “Powder Flow Tester”.....	72
Tabela 7 - Ângulo de atrito do produto com a parede obtido pelo aparelho “Jenike Shear Cell”.	74
Tabela 8 - Função Fluxo obtida com os aparelhos “Jenike Shear Cell”, classificado de acordo com Jenike (1964), e “Powder Flow Tester”.....	78
Tabela 9 - Fator K obtidos a partir dos dados ensaiados nos aparelhos de “Jenike Shear Cell” e “Powder Flow Tester”.....	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos produtos de acordo com a sua granulometria.....	29
Quadro 2 - Qualidade da água segundo a atividade de água.....	32
Quadro 3 - Comparação direta dos ensaios de cisalhamento.	41

LISTA DE ABREVIATURAS

ABIC	Associação Brasileira da Indústria do Café
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
LACRA	Laboratório de Construções Rurais e Ambiente
LaMEM	Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira
OIC	Organização Internacional de Café
PFT	Powder flow tester
RST-XS	Teste de anel de cisalhamento do Dr. Dietmar Schulze
TC	Torra clara
TCFM	Torra clara granulometria média
TCGF	Torra clara granulometria fina
TCGG	Torra clara granulometria grossa
TM	Torra média
TMGF	Torra média granulometria fina
TMGG	Torra clara granulometria grossa
TMGM	Torra média granulometria média
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFLA	Universidade Federal de Lavras

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
b.u.	Base úmida (%)
C	Coessão (kNm^{-2})
d	Granulometria
EYL	Efetivo Lugar Geométrico
ff	Fator fluxo da tremonha
FF	Função Fluxo
F_v	Força vertical
g	Aceleração da gravidade (ms^{-2})
K	Fator K
N	Newton (medida de força)
ρ	Densidade da amostra (Kgm^{-3})
σ_1	Tensão Principal De Consolidação (kNm^{-2})
σ_{inc}	Resistência Inconfinada (kNm^{-2})
WP	Carga sobre o pendural de pesos no pré- <i>shear</i> (N)
WS	Carga sobre o pendural de pesos no <i>shear</i> (N)
YL	Lugar Geométrico Instantâneo
σ	Tensão Normal (kNm^{-2})
σ_1	Tensão de consolidação (kNm^{-2})
σ_1'	Tensão atuante num arco estável imaginário (kNm^{-2})
σ_p	Tensões normais de pré- <i>shear</i> (cisalhamento) (kNm^{-2})
σ_s	Tensão normal de <i>shear</i> (cisalhamento) (kNm^{-2})
τ	Cisalhamento (kNm^{-2})
τ_p	Tensões de cisalhamento de pré- <i>shear</i> (kNm^{-2})
τ_s	Tensão de cisalhamento de <i>shear</i> (kNm^{-2})
Υ	Peso específico ou Densidade (kgm^{-3})
φ_e	Efetivo ângulo de atrito interno ($^{\circ}$)
φ_e	Efetivo ângulo de atrito interno ($^{\circ}$)

φ_i	Ângulo de atrito interno (°)
φ_i	Ângulo de atrito interno (°)
φ_r	Ângulo de repouso do produto (°)
$\varphi_{w,c}$	Ângulo de atrito entre o produto armazenado e o material da parede (°)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1	Importância da cafeicultura	21
2.2	Café em cápsulas.....	22
2.2.1	O mercado do café em cápsulas.....	22
2.2.2	O processo de encapsulamento.....	23
2.2.3	A qualidade do café em cápsula	26
2.3	Propriedades físicas do produto armazenado.....	27
2.4	Atividade de água	31
2.4.1	Determinação da atividade de água	32
2.5	Fluxo	33
2.5.1	Função Fluxo	36
2.5.2	Fator fluxo da tremonha.....	37
2.6	Fator K.....	38
2.7	Ensaio de cisalhamento.....	39
2.7.1	“Jenike Shear Cell”	41
2.7.2	“Powder Flow Tester” (PFT)	42
2.8	Estudos realizados	47
3	MATERIAL E MÉTODOS	49
3.1	Preparação das amostras.....	50
3.2	Ensaio de cisalhamento	53
3.2.1	Jenike Shear Cell	53
3.2.2	“Powder Flow Tester” (PFT)	63
3.3	Determinação das propriedades.....	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.1	Atividade de Água	66

4.2	Propriedades físicas	68
4.3	Função Fluxo	77
4.4	Fator K.....	79
5	CONCLUSÕES.....	81
	REFERÊNCIAS.....	83
	APÊNDICE A – Gráficos dos Círculos de Mohr obtidos com o aparelho “Jenike Shear Cell”	92
	APÊNDICE B – Gráficos dos Círculos de MOhr obtidos com o aparelho “Powder Flow Tester”	95

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país que possui sua economia sustentada na agricultura, principalmente devido à produção de grãos. Dentre estes, podemos destacar o café, visto que o país é o maior produtor e exportador mundial (INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION – OIC, 2018), e em algumas regiões este produto sustenta a economia local. Ser o maior produtor de café não é o bastante para ser relevante no mercado internacional. Na cafeicultura moderna o diferencial é a priorização da qualidade, adotando-se procedimentos adequados na colheita e pós colheita, como o beneficiamento e o armazenamento. Justifica-se assim, a busca do conhecimento especializado que viabilize a construção de máquinas de processamento (plântio, colheita, secagem e beneficiamento) e das estruturas de armazenamento dos grãos de café.

O adequado armazenamento e manuseio do produto ocorrerá em estruturas especialmente dimensionadas para este propósito. Em projetos de engenharia deve-se priorizar a segurança e a economia. Para a construção de silos, além do conhecimento das ações permanentes que agem comumente em um sistema construtivo, é necessário o conhecimento das ações variáveis que são provocadas pelos produtos armazenados oriundas do carregamento, do tempo de armazenamento e da descarga. O tipo de fluxo define as pressões nas paredes e na tremonha e, para prever o padrão de fluxo, é necessário o embasamento teórico das propriedades físicas do produto armazenado. O conhecimento destas propriedades possibilita a realização de projetos seguros e economicamente viáveis.

Em projetos de silos deve-se sempre considerar o método dos estados limites e tendo como base as ações provocadas pelo produto, a operação de descarga é a condição mais desfavorável, que impõe maiores variações de pressão. Nesta etapa as suas características e a distribuição de pressões nas paredes e fundações do silo são determinadas pelo tipo de fluxo. O tipo de fluxo é definido pelas características físicas do produto armazenado, a geometria do silo e a rugosidade da parede da tremonha. As pressões provocadas pelo produto armazenado podem ser calculadas por algumas teorias e com base em algumas normas técnicas, sendo que estas utilizam-se das características físicas do produto.

As principais propriedades físicas utilizadas para a predição do fluxo e cálculo das pressões em projetos estruturais de silo são: peso específico, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito

interno e ângulo de atrito do produto com a parede. Para a determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados utiliza-se aparelhos de cisalhamento, podendo ser medidos de forma direta ou indireta.

Aparelhos de cisalhamento utilizados no campo da mecânica dos solos foram adaptados para serem aplicados à agroindústria. Há um consenso que o aparelho mais indicado, por trazer resultados confiáveis das propriedades de fluxo ou de produtos armazenado, é o “Jenike Shear Cell”, que foi idealizado por Jenike na década de 60, sendo capaz de determinar o ângulo de atrito do produto, o efetivo ângulo de atrito do produto, o ângulo do produto com a parede e o efetivo ângulo do produto com a parede, e de distinguir os dois tipos de fluxo existentes, o de massa e o de funil, possibilitando que problemas de fluxo sejam evitados por meio do cálculo correto do silo. Com o avanço tecnológico, surgiram novos aparelhos de cisalhamento que buscam trazer os mesmos resultados dos testes tradicionais com o dinamismo da atualidade, podendo ser utilizados em testes na indústria. Entre os mais modernos, pode-se citar o equipamento “Powder Flow Tester”, oriundo da parceria da empresa Brookfield com o Wolfson Center for Bulk Solids Handling Technology da Universidade de Greenwich na Inglaterra, que é capaz de medir o comportamento de fluxo de materiais sólidos a granel que possuem partículas com o tamanho médio de 1mm, podendo chegar até 2mm, dados de densidade aparente, curva de fluxo, ângulo de atrito interno e de parede, diâmetro de arco coesivo e de “rat hole” além do cálculo do ângulo da tremonha.

Devido à variedade de aparelhos de cisalhamento disponíveis é significativo que se faça uma comparação entre o mais tradicional e o moderno, para validar o moderno e ao mesmo tempo determinar as propriedades físicas e de fluxo do produto. É adequado que este estudo se faça com café torrado e moído, visto o crescente mercado consumidor e por este se apresentar como alternativa para agregar valor ao grão café.

Objetivou-se neste contexto comparar o aparelho de “Jenike Shear Cell” com o “Powder Flow Tester”, para verificar se este pode ser um método mais dinâmico em atendimento às necessidades da agroindústria. Para tanto, determinou-se as propriedades físicas (ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito do produto com a parede) e de fluxo (função fluxo e fator K), do café arábica torrado e moído como embasamento para o cálculo de fluxo, pressões em silos e calibrações de equipamentos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância da cafeicultura

Desde meados do século XVIII o café possui grande importância econômica, possuindo legislação específica e diversos estudos buscando a promoção da sustentabilidade da atividade. A cafeicultura é fonte de receita de diversos municípios e grande gerador de postos de trabalho no agronegócio nacional.

O acompanhamento da safra de café, robusta e arábica, realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2017) levantou que na safra do ano de 2017 foram colhidos 44,97 milhões de sacas, representando uma redução de 12,5% com relação a produção de 51,37 milhões do ciclo anterior, esta redução é esperada devido a bialidade negativa na maior parte dos estados produtores. Com os valores de produção de safras de café no mundo, fornecidos pela Organização Internacional de Café (OIC, 2018) verifica-se que o Brasil é responsável por aproximadamente 33% de toda produção mundial. O país além de ser o maior produtor mundial do café, com uma produção média de 44 milhões de sacas de café, também é um dos países com maior consumo da bebida, o consumo entre novembro/2013 a outubro/2014 foi de 81 litros/habitante ano, segundo a Associação Brasileira da Indústria do Café (ABIC, 2015).

O café está presente na agricultura brasileira desde o Brasil império, sempre se adaptando ao mercado consumidor. Buscando atender o mercado atual, que exige produtos de qualidade, a indústria cafeeira está se reinventando nas suas aplicações, desde o café em cápsulas até em produtos estéticos, provocando modificações na estrutura desta agroindústria, desde o processamento até a sua apresentação final ao consumidor.

Na cadeia produtiva do café, o setor fornecedor de insumos compreende as empresas/instituições produtoras de defensivos, fertilizantes, combustíveis, material de consumo, material genético, equipamentos e prestadores de serviços. No setor produtivo tem-se o cafeicultor, o armazenador, o beneficiador, o industrial, o distribuidor e o exportador, incluindo seus meios de produção, instalações, sistemas logísticos e gerenciais e no setor consumidor é composto pelos indivíduos ou corporações que adquirem café em grão ou café processado (INNOCENTINI, 2015).

Analisando a política cafeeira em vigor com uma visão macro, observa-se que nos segmentos da cadeia produtiva, na pós-colheita, são deficitárias as pesquisas e investimentos que aumentem a efetividade dessa etapa, cabendo ainda estudos e diretrizes que alterem essa realidade. Innocentini (2015) destaca que o mercado mundial de café movimenta bilhões de dólares anualmente. O Brasil, apesar de ser o maior produtor não possui esse retorno financeiro de forma proporcional. Para aumentar a representatividade na quantia do valor movimentado o ideal seria investimentos na indústria de transformação, em concursos de qualidade e indicação de origem, procedimentos estes, pouco realizados no país.

2.2 Café em cápsulas

2.2.1 O mercado do café em cápsulas

O mercado do café é muito consistente, segundo a ABIC (2018), no ano de 2017, foram consumidas 21,99 milhões de sacas de café, representando um crescimento de 3,6% em relação à 2016, atravessando os piores momentos da crise econômica brasileira sem sofrer impacto no que se refere ao consumo. As cápsulas representaram apenas 0,6% do volume total consumido no ano de 2014, entretanto a previsão é que este valor mais que dobre até 2019, sendo que internacionalmente verifica-se que desde 2004 há um crescimento no consumo de cápsulas superior a 20% ao ano (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CAFÉ – ABIC, 2017a). Este aumento constata-se pelo fato que os consumidores procuram praticidade, qualidade e diversidade no café, tudo que pode ser encontrado nas cápsulas que, como resultado dessa procura, apresenta o maior crescimento no mercado de consumo de café. Traçando-se o perfil destes consumidores apura-se que 91% são lares de classe A e B, com 3 a 4 pessoas ou casais que moram sozinhos (HERSZKOWICZ, 2015).

Primeiramente o café em cápsulas era vendido apenas por uma empresa, que possuía a patente de fabricação, e adentrou no mercado brasileiro em 2006. Em 2012, houve a expiração das principais patentes e o mercado recebeu inúmeras outras marcas que poderiam fabricar o refil da máquina e outros padrões de cápsulas. Herszkowicz (2015) ressalta que o monopólio e o preço

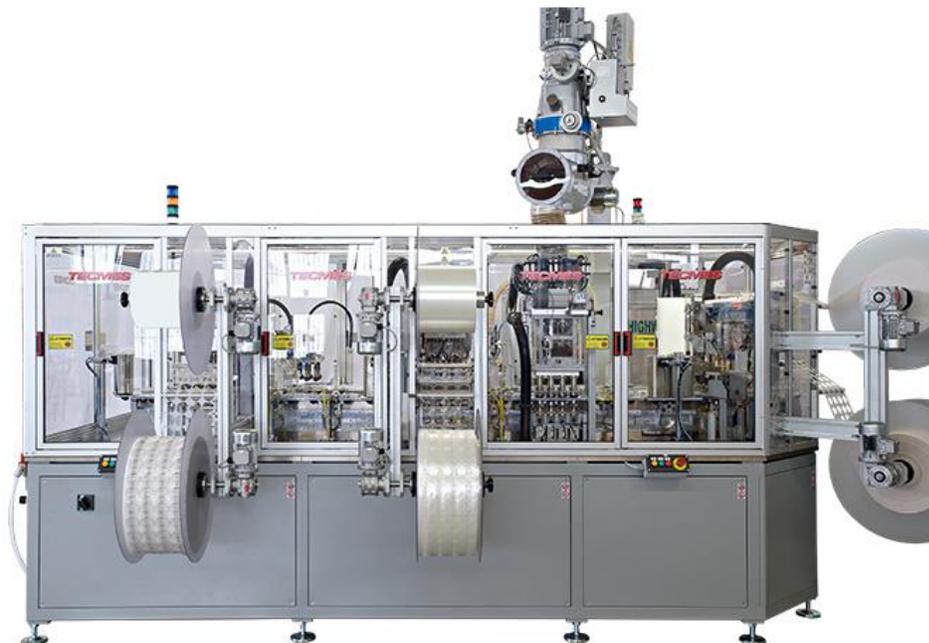
eram fator limitante no consumo, mas com a chegada da concorrência, os preços reduziram e a oferta de tipos de máquinas e cápsulas aumentaram, propiciando o aumento no consumo.

2.2.2 O processo de encapsulamento

Singelamente, as cápsulas são pequenos recipientes que acomodam café torrado e moído, que serão utilizadas em máquinas próprias para o preparo rápido do café. Devido à variedade de máquinas e exigências do mercado encontra-se diferentes tipos e formas de cápsulas no mercado, sendo fabricadas em papel, plástico ou metal (alumínio), e podem ser descartáveis ou reutilizáveis. A escolha do material dependerá do objetivo final do seu uso. As cápsulas carregam consigo a premissa que foram criadas para revelar todos os aromas e caráter do café, apresentando-se como uma embalagem fechada hermeticamente que protege o café, que deve ser recém moído, do ar, da luz e da umidade.

O processo para o encapsulamento é diversificado, passando por grandes empresas com objetivo de produzir milhares de cápsulas por dia, a pequenas e médias empresas que são capazes de atender uma pequena produção. Facilmente, pode se comprar máquinas para encapsular o café, sendo para uso particular ou comercial. Na Figura 1 é ilustrada uma máquina de encapsulamento automática de café com capacidade de produção de 200 a 600 cápsulas por minuto.

Figura 1 - Máquina automática de encapsulamento.



Fonte: Tecmes, 2018.

Máquinas de porte industrial funcionam de forma totalmente automatizada e protegida do contato humano. O café previamente torrado é direcionado para ser moído na peça que fica na parte superior do equipamento. Após ser moído, todo o processo ocorrerá no interior da máquina, que possui ambiente com atmosfera modificada. Na etapa seguinte o café é encaminhado para o dosador, onde o pó é pesado e direcionado para cada cápsula. O pó dentro da cápsula é prensado e depois a cápsula é fechada com a tampa de alumínio. As cápsulas são reunidas em embalagens que recebem adição de nitrogênio, para conservar o frescor do café.

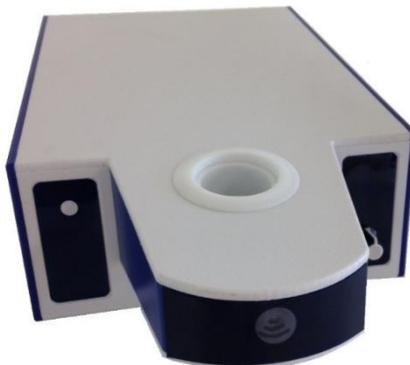
Para atender os pequenos e médios produtores existem máquinas manuais que realizam o selamento das cápsulas. Na Figura 2, uma máquina capaz de selar 25 cápsulas por vez, com uma estimativa de 3000 cápsulas por hora e na Figura 3, uma máquina que sela apenas uma cápsula por vez, com estimativa de 150 cápsulas por hora.

Figura 2 - Máquina seladora de cápsula manual.



Fonte: Capfree, 2018.

Figura 3 - Máquina seladora de cápsula manual e individual.



Fonte: Sanertel, 2018.

Nessas máquinas apenas a parte final do processo é realizado, com todas as operações ocorrendo de forma manual. As cápsulas são preenchidas com o café já torrado e moído, então este é compactado com auxílio de um bastão. Depois coloca-se um selo em cada cápsula e esta é posicionada na máquina que faz a vedação.

2.2.3 A qualidade do café em cápsula

A qualidade do café em cápsula é verificada pelas diversas misturas (*blends*) que podem ser produzidas, misturando aromas e sabores de todo o mundo. Os grãos passam por uma classificação de tamanho, densidade e cor e são criteriosamente selecionados para compor a cápsula.

Todos os cuidados com a qualidade do café, plantio, colheita e pós colheita, podem ser observados no seu preparo, desde que o mesmo ocorra de forma que ressalte essas qualidades. A bebida café é produzida após a extração do aroma e sabor do café torrado e moído por meio da água quente, por um processo conhecido por infusão. Este processo pode ocorrer por filtração, percolação, prensagem ou pressão. O café é processado em pressão, gerando uma bebida cremosa e aromática, sendo considerado o método mais harmonioso para evidenciar todas as nuances da mesma. A água, sempre pura e limpa, deve estar a temperatura adequada, em torno de 90°C, e passar sobre o café torrado e moído sobre pressão, em torno de 9 atm. Para que durante a passagem da água ocorra a correta infusão da bebida, tanto a torra como a moagem devem estar em parâmetros adequados.

A norma de qualidade da ABIC (ABIC, 2017b) recomenda a torra e a moagem corretas para um café ser considerado de qualidade. Para o preparo de cápsulas é recomendado que a torra seja a mais clara, preservando os óleos aromáticos, visto que grãos muito torrados tornam-se oleosos e perdem aroma e sabor. A moagem irá depender da pressão da máquina, sabe-se que se a moagem for grossa a água passa mais rápido e a bebida fica fraca e se a moagem for fina a água demora a sair e a bebida fica amarga, aconselhando-se, portanto, a moagem média.

O café depois de ser torrado e moído é encaminhado para o enchimento das cápsulas. A quantidade de pó de café irá variar de acordo com o *blend* e o tipo de bebida a ser produzido. Todo o processo é mecanizado: o enchimento, a pesagem, a colocação de tampas, a selagem, e a colocação das cápsulas em embalagens. Para uma otimização desta mecanização é de suma importância que as propriedades físicas e de fluxo do café sejam conhecidas.

2.3 Propriedades físicas do produto armazenado

O conhecimento das propriedades físicas do produto armazenado é o primeiro passo para o projeto estrutural e de fluxo de silos. São importantes propriedades:

- Peso específico em função da consolidação e umidade (Υ);
- Granulometria ($d_{m\acute{a}x}$ e $d_{m\acute{i}n}$);
- Ângulo de repouso do produto (φ_r),
- Ângulo de atrito interno (φ_i);
- Efetivo ângulo de atrito interno (φ_e);
- Ângulo de atrito ($\varphi_{w,c}$) entre o produto armazenado e o material da parede;
- Fator fluxo da tremonha (ff).
- Função fluxo instantânea e com o tempo de consolidação (FF).

Todas as propriedades são obtidas em laboratório, que utilizam diversos ensaios e métodos. Algumas destas propriedades podem ser obtidas por meio do ensaio de cisalhamento. Este ensaio pode ser realizado pelo cisalhamento direto, que utiliza o aparelho conhecido internacionalmente como “Jenike Shear Cell”, aparelho idealizado por Jenike (1964), ou devido ao avanço da tecnologia de computadores e criação de softwares é possível encontrar no mercado um aparelho de cisalhamento mais moderno, rotacional, conhecido como “Powder Flow Tester”.

As propriedades são comumente afetadas por diversos fatores, como: peso específico, compactação, compressibilidade, tamanho e forma das partículas, ângulo de repouso, umidade e outros. Em relação ao café, pode-se ainda, destacar a torra e a moagem, como processos da industrialização do café que afetam as propriedades físicas e de fluxo. Pesquisadores geralmente estudam a variabilidade das propriedades em função destes fatores. Silva (2003) determinou as propriedades físicas dos grãos de café em função da variação da umidade e do tempo de consolidação. Cheung (2009) caracterizou a umidade, a temperatura e o peso específico aparente para determinar as propriedades físicas da soja, do milho e da ração de frango. Lopes Neto (2009a) caracterizou a umidade e variou o tempo de consolidação de quatro produtos pulverulentos (farinha de trigo, amido de milho, fécula de mandioca e farinha de milho). Oliveira et al (2014) avaliaram

e determinaram as propriedades físicas sob a influência de dois níveis de torra e três granulometrias diferentes, além das propriedades físicas comuns foi determinada também a atividade de água.

O peso específico (γ) ou densidade afetam diretamente a compressibilidade do produto. Por definição é a massa das partículas sólidas dividido por um determinado volume que ocupa e multiplicado pela aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$). O peso específico do produto armazenado em um silo é função da sua umidade, das sobrepressões que ocorrem no silo, do tempo de armazenamento, da taxa de carregamento, do modo de carregamento e da altura de queda do produto (GOMES; CALIL JÚNIOR, 2005). Mesmo que alguns métodos de cálculos de pressões, como o método de Janssen e as normas alemã e americana, não considerem a ocorrência do peso específico, o conhecimento do seu valor é importante pois afeta as principais propriedades físicas e serve como parâmetro para a determinação do fluxo e das pressões em silo (CALIL JÚNIOR et al, 1997).

A umidade é um fator fundamental no armazenamento de grãos. Valores elevados de umidade propiciam ambiente favorável ao ataque de insetos e fungos, e juntamente com a temperatura afetam a intensidade da respiração dos grãos, influenciando na qualidade dos grãos armazenados. Para o armazenamento de grãos de café o anexo da Instrução Normativa N° 08 (MAPA, 2003) indica que a umidade, independente da classificação do grão de café, não pode ser superior ao valor de 12,5% b.u.. Silva (2003) determinou as propriedades físicas dos grãos de café em função do teor de umidade, do tempo de consolidação e dos diferentes materiais de parede.

A umidade juntamente com a temperatura determina a atividade de água, que influenciam na capacidade de absorção de água, acarretando na aglomeração do produto e mudanças nas propriedades de fluxo. Estudos acerca da vida útil e qualidade do café em função da atividade de água foram realizados, como o feito por Cardelli e Labuza (2001), que detectaram, em café torrado e moído armazenado, um aumento da atividade de água de 0,1 levou a um aumento de 60% na deterioração. Corrêa et al (2010) afirmam que a atividade de água e o conhecimento das propriedades termodinâmicas de produtos agrícolas é importante fonte de informação para avaliar a microestrutura dos alimentos e o estudo dos fenômenos físicos. Devido a sua importância e influência nas mudanças de propriedades de fluxo a atividade de água será melhor estudada adiante, na seção sobre atividade de água.

A torrefação do café é o procedimento no qual os grãos crus são levados à alta temperatura, variando entre 200 e 300°C, durante um determinado período de tempo, em função do grau de torra desejado. Este processo irá alterar o teor de água do café e afetar a composição química. Segundo a ABIC (2017), grãos muito torrados tornam-se oleosos e perdem o sabor, portanto o sabor da bebida café depende do grau de torra. São realizados muitos estudos sobre a qualidade da bebida em função dos diferentes níveis de torra, e alguns autores relataram mudanças na textura em função do grau de torra (PITTIA et al., 2001), mudanças nas propriedades físicas (MWITHIGA; JINDAL, 2003) e a avaliação das mudanças das propriedades físicas de grãos em dois níveis de torra (OLIVEIRA et al., 2014).

A forma e o tamanho dos grãos apresentam uma configuração irregular. Portanto a sua descrição é de suma importância para o dimensionamento e o tamanho de peneiras, para o dimensionamento de sistemas de transportes por ar ou água, para predições do comportamento destes em situações de carga e descarga de silos e em estudos de danos em grãos (BORÉM, 2008). A forma e o tamanho são caracterizados com o auxílio de três medidas, formando um objeto tridimensional, a largura, a espessura e o comprimento, sendo que em grãos esféricos utiliza-se apenas o diâmetro.

A granulometria é um importante fator no projeto de um silo, pois interfere diretamente no fluxo do produto. Classificando-a é possível caracterizar o tipo de fluxo. A determinação da granulometria dá-se de forma simples, utilizando-se de jogo de peneiras. Calil Júnior (1984) classificou os produtos em função da sua granulometria (Quadro 1).

Quadro 1 - Classificação dos produtos de acordo com a sua granulometria.

D > 0,42 mm	Granulares
0,42 < D < 0,149	Pulverulentos Coesivos
0,149 < D < 0,079	Pulverulentos Coesivos Finos
D > 0,079	Pulverulentos Coesivos Extra-finos

Fonte: Calil Júnior(1984)

Para grãos de café a granulometria também é importante fator na aceitação do consumidor. Sabe-se que se a moagem for grossa (granulometria maior) a água é filtrada rapidamente e a bebida

fica fraca e se a moagem for fina (granulometria menor) a água é filtrada demoradamente a bebida fica amarga. Devido a essa alteração no sabor, em “Norma de qualidade recomendável e boas práticas de fabricação de cafés torras em grãos e cafés torrados e moídos” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ - ABIC, 2017) é recomendado que a moagem a ser utilizada deve ser a média, e fica definido que a separação em granulometrias diferentes será feita por peneiras. No mesmo documento a classificação indica que a granulometria fina tem 0,60mm; a granulometria média 0,85mm e a granulometria grossa 1,18 mm. Portanto, os cafés assim moídos são classificados como produtos granulares. Entretanto, Oliveira et al. (2014) constataram mudanças nas propriedades de fluxo em cafés em diferentes granulometrias.

O ângulo de repouso do produto (φ_r) pode ser determinado com o auxílio de uma plataforma cilíndrica circular de diâmetro conhecido e com uma haste graduada em seu centro, o produto é então depositado com a ajuda de um funil. A altura do talude formado pelo produto e a plataforma é então medido, sendo possível calcular o ângulo de repouso do produto. Segundo Jenike (1964) o ângulo de repouso não é uma medida da capacidade de escoamento do produto, mas é muito popular no meio científico devido a sua facilidade de determinação.

O ângulo de atrito interno (φ_i) é proveniente das condições internas do produto, sendo uma medida de interação entre as partículas, portanto aumenta com o peso específico ou com a diminuição de espaços vazios. Este difere-se do ângulo de repouso em função das pressões impostas, tendendo a ser maior do que este. Pode ser determinado considerando-se o ângulo que o lugar geométrico de deslizamento no círculo de Mohr forma com a horizontal. Para Gomes e Calil Júnior (2005) o ângulo de atrito interno serve como parâmetro do critério de resistência e é mais acentuado para produtos sem coesão.

O efetivo ângulo de atrito interno (φ_e) é uma medida de fricção entre as partículas, que depende da rugosidade, da forma e do tamanho das partículas. Pode ser determinado por meio do círculo de Mohr, sendo o ângulo com a horizontal do gráfico de tensões e da reta que parte da origem e é tangente ao lugar geométrico de deslizamento do círculo. Para projetos de silos que possuem tremonhas com produto de fluxo livre, pode-se considerar que o efetivo ângulo de atrito interno é obtido de forma semelhante ao ângulo de atrito interno.

O ângulo de atrito entre o produto armazenado e o material da parede ($\varphi_{w,c}$) é uma medida de fricção entre a partícula e a parede do silo. Pode ser determinado substituindo-se a parte inferior

da célula de cisalhamento de Jenike pelo material que será testado, geralmente madeiras e diferentes tipos de aço. O lugar geométrico do ângulo de atrito do produto com a parede é plotado no mesmo gráfico do lugar geométrico do ensaio para obtenção do ângulo de atrito do produto e extrapolado até um ponto de interseção com o círculo de Mohr de maior consolidação. É traçada uma linha reta partindo da origem até o ponto de interseção com o círculo de Mohr. O ângulo desta linha com o eixo horizontal é o ângulo de atrito com a parede ϕ_w para esta particular tensão de consolidação. Os testes são repetidos para outras tensões de consolidação (GOMES, 2000). De acordo com Fitzpatrick et al. (2004a) quanto maior o ângulo de atrito com a parede, mais difícil é o movimento do pó ao longo da superfície desta.

O Fator fluxo da tremonha (ff) e a Função fluxo instantânea e com o tempo de consolidação (FF) serão melhor estudados adiante, na seção sobre fluxo, devido a sua importância em projetos e a sua inserção dentro do tema.

2.4 Atividade de água

A água influencia diretamente as propriedades reológicas de um produto, assim como as propriedades físicas e de fluxo. Pode-se classificar a água retida nos grãos em quatro tipos: a primeira é a de constituição que é removida por reações de oxidação das molécula a ela ligada; a segunda é a água adsorvida em moléculas e macromoléculas constituintes dos grãos e é parcialmente retirada dependendo das características do produto e condições de secagem; a terceira encontra-se nos grãos sob tensão osmótica e possui funções biológicas, sendo retirada por meio de secagem; e a quarta é constituída por água absorvida, sendo bastante móvel e facilmente removida pelo processo de secagem (BORÉM, 2008). O referido autor destaca que para expressar o estado da água em relação aos grãos o conceito qualitativo de atividade de água deve ser o preferido. A atividade de água é um parâmetro capaz de avaliar a disponibilidade de água livre de forma qualitativa (SCOTT, 1957), sendo considerada uma medida do estado de energia da água em um sistema.

Por definição, atividade de água é a relação entre a pressão de vapor d'água em equilíbrio no interior do produto e a pressão de vapor d'água saturado presente no ar sob a mesma temperatura

(FONTANA JR, 2008). Pode-se classificar a qualidade da água presente no alimento por meio do seu valor de atividade de água, que encontram-se entre 0 a 1 (Quadro 2):

Quadro 2 - Qualidade da água segundo a atividade de água.

Qualidade da água no alimento	Atividade de água
Fortemente ligada	<0,3
Moderadamente ligada	0,3 a 0,7
Fracamente ligada	>0,7
Não ligada	1

Fonte: Barbosa-Cánovas; Vega-Mercado (1996).

A umidade relativa de um alimento pode ser obtida através do valor da atividade de água, multiplicando o seu valor por 100.

A atividade de água vem sendo utilizada como medida de segurança em alimentos, visto que a atividade de água influencia a cor, odor, sabor, textura e vida útil de muitos produtos. Isto pode ser verificado em Cardelli e Labuza (2001) que estudaram o efeito da atividade de água para determinar a vida de prateleira do café torrado e moído. De forma inovadora Oliveira et al. (2014) utilizaram a atividade de água para caracterizar fisicamente o café após a torrefação e moagem.

2.4.1 Determinação da atividade de água

Diversas técnicas podem ser empregadas na determinação da atividade de água. Labuza et al. (1976) relataram que aparelhos que utilizam da técnica de ponto de orvalho são precisos e rápidos para fornecerem a atividade de água de uma amostra. A técnica consiste em focar um feixe infravermelho em um pequeno espelho que determina o ponto de orvalho preciso da amostra. A temperatura do ponto de orvalho é então traduzida em atividade de água. Nestes aparelhos a amostra é posicionada numa câmara fechada e posta em equilíbrio, a umidade relativa do ar na câmara é a mesma que a atividade de água da amostra.

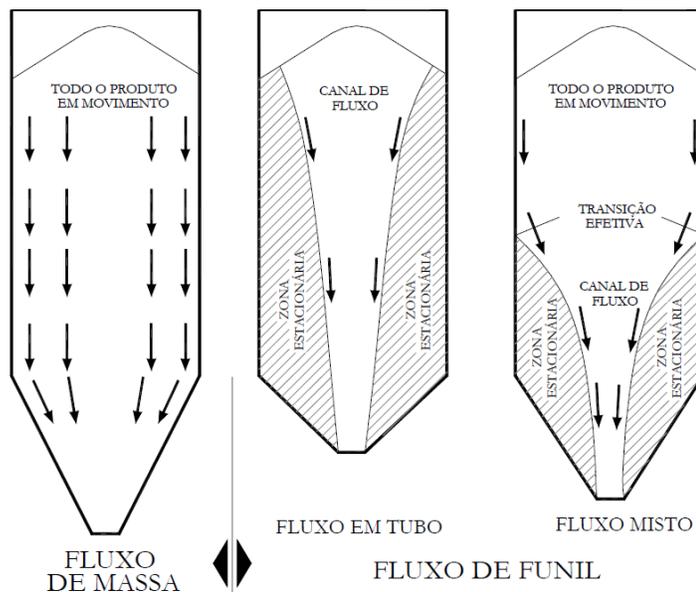
Como exemplo de um aparelho comercial que utiliza a técnica de ponto de orvalho temos o AquaLab da empresa Decagon. Em alguns modelos o aparelho não é capaz de controlar a temperatura, sendo ideal para o seu funcionamento que as análises sejam feitas em uma sala com a temperatura controlada e que a amostra esteja climatizada com o ambiente. Quanto menor a diferença de temperatura da amostra com a temperatura de procedimento do aparelho, mais rápida será a leitura.

2.5 Fluxo

Segundo Calil Júnior et al. (1997), a capacidade do produto fluir depende da resistência desenvolvida pelo produto, que é função da capacidade de consolidação deste. Existem diversos parâmetros que influenciam no correto funcionamento do fluxo, como a função fluxo e o fator fluxo, que são importantes propriedades físicas do produto armazenado. Para conhecê-las deve-se caracterizar o fluxo. O tipo de fluxo geralmente é dividido em dois padrões bem distintos (Figura 5):

- Fluxo de massa: todas as partículas estão em movimento durante a operação de descarga, sendo o ideal para produtos armazenados pois a descarga será completa.
- Fluxo de funil: algumas partículas não se movimentam durante a operação de descarga, originando uma zona estática, e algumas partículas se movimentam por um canal formado alinhado com a boca de descarga. Este padrão engloba o fluxo misto, onde a zona estática muda de acordo com a descarga, e há uma zona de transição efetiva, onde as partículas ora não se movimentam, ora se movimentam.

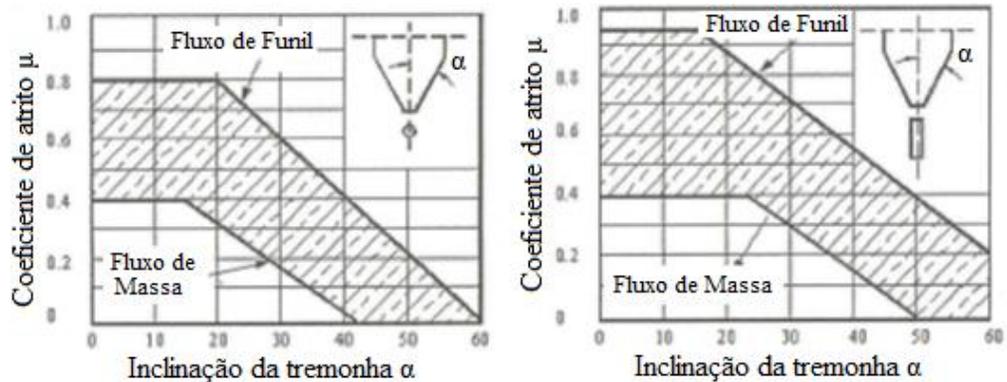
Figura 4 - Principais tipos de fluxo.



Fonte: Calil Júnior e Cheung (2007)

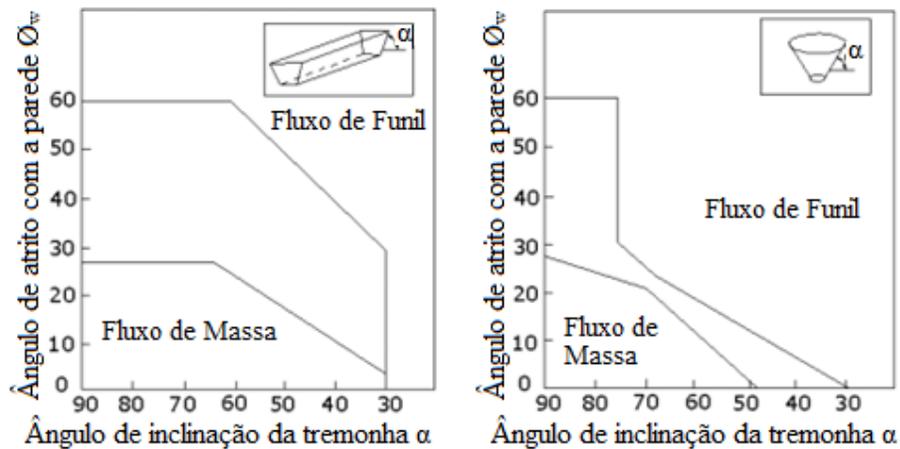
Para tentar prever o tipo de fluxo que irá ocorrer em um silo as principais normas internacionais apresentam geralmente dois gráficos, que consideram o coeficiente de atrito ou o ângulo de atrito com a parede em função do ângulo de inclinação das paredes da tremonha variando com o formato de saída desta. A Figura 6 ilustra estes gráficos adaptados por Calil Júnior e Cheung (2007) da norma AS 3774:1996 e na Figura 7 os gráficos encontrados nas normas DIN 1055-6 (2005), EUROCODE 1:4 e na ISO 11697.

Figura 5 - Determinação gráfica do tipo de fluxo.



Fonte: Adaptado da AS 3774:1996 por Calil Júnior (2007).

Figura 6 - Determinação gráfica do tipo de fluxo.



Fonte: Adaptado da AS 3774:1996 por Calil Júnior(2007)

O fluxo pode sofrer uma obstrução, formada pelo próprio produto, geralmente, por este adquirir uma resistência suficiente para suportar o próprio peso, advinda da consolidação. Essencialmente há duas formas de obstruções, arco e tubo, e elas dependem principalmente das propriedades físicas do produto, da geometria do silo e dos materiais constituintes. Para entender as obstruções é importante o conhecimento da Função Fluxo (FF) e do fator fluxo da tremonha (ff).

2.5.1 Função Fluxo

A Função Fluxo depende da resistência inconfinaada (σ_{ic}), da tensão principal de consolidação (σ_1) e do tempo (t). O seu valor, obtido a partir da Equação 1, é utilizado para caracterizar o comportamento de fluxo dos produtos armazenados.

$$FF = \frac{\sigma_1}{\sigma_{ic}} \quad (1)$$

Jenike (1964) definiu a capacidade de fluxo dos produtos de acordo com faixas de valores da função fluxo:

FF < 2	Produtos muito coesivos não fluem
2 < FF < 4	Produtos coesivos
4 < FF < 10	Produto que flui facilmente
FF > 10	Produto em fluxo livre

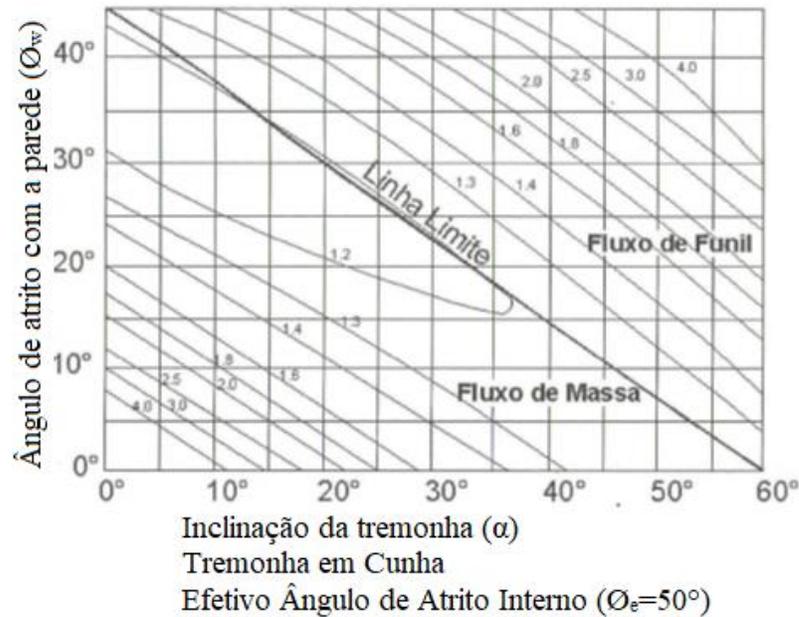
Pode-se observar que quanto maior o valor de FF, mais livre o fluxo do produto. Cada produto armazenado apresenta seu próprio valor, e tendem a piorar a capacidade de fluxo com o aumento da umidade e do tempo de consolidação. O referido autor destaca que a consolidação do produto pode ser causada pelos seguintes fatores, ou uma combinação destes:

1. Entrada ou saída de ar com correspondente variação da densidade.
2. Migração de água.
3. Vibração externa, devido à operação de máquinas ou vento, que podem causar rearranjo de partículas e aumento da densidade.
4. A evaporação da água livre juntamente com precipitação de sais dissolvidos que aglutinam a partícula.
5. Rompimento ou amolecimento dos cristais das partículas sob pressão, causando aumento na superfície de contato e da coesão.
6. Alterações na superfície das partículas, como por exemplo, a cristalização e fermentação.

2.5.2 Fator fluxo da tremonha

O fator fluxo da tremonha depende da geometria, do efetivo ângulo de atrito e do ângulo de atrito com a parede, sendo uma propriedade do conjunto do silo. O seu valor também serve como indicativo da fluidez do produto armazenado. Existem diversas teorias para se determinar o fator fluxo da tremonha. Jenike (1964) usou a teoria de campo de tensões radiais, que determina perto da saída da tremonha o campo de tensões durante a descarga. Entretanto, a teoria leva a um sistema de equações diferenciais parciais ordinárias e necessitam de um método numérico de resolução. O próprio autor publicou as resoluções na forma de gráficos, no qual se utiliza o ângulo de atrito do produto com a parede e o ângulo de inclinação da tremonha para localizar o tipo de fluxo que irá ocorrer em uma determinada geometria de tremonha e para um determinado efetivo ângulo de atrito interno. A Figura 8 é um exemplo de gráfico para a determinação do fator fluxo.

Figura 7 - Exemplo de gráfico para a determinação do fator fluxo.



Fonte: Jenike (1964)

Para caracterizar o fator fluxo da tremonha pode-se utilizar a Equação 2.

$$ff = \frac{\sigma_1}{\sigma_1'} \quad (2)$$

Em que, σ_1 é a tensão de consolidação e σ_1' é a tensão atuando em um arco estável imaginário.

2.6 Fator K

Para o cálculo das pressões que o produto armazenado exerce sobre as paredes laterais e sobre o fundo de um silo utiliza-se vários parâmetros, dentre deles o fator K, que é definido como a relação entre a pressão horizontal e a pressão vertical em qualquer ponto de uma massa granular. Diversos autores propuseram equações para a definição do valor K, conforme listado na Tabela 1 de Cheung (2007).

Tabela 1 - Formulações para o valor de K sugeridos por diversos pesquisadores.

Autor	Expressão sugerida	Comentários
Rankine-Koenen	$K = \frac{1 - \text{sen}\phi_e}{1 + \text{sen}\phi_e}$	Inicialmente proposta por Rankine para solos, foi sugerida por Koenen para utilização na formulação de Janssen. É válida para ângulos de atrito com a parede igual a zero.
Jaky	$K = \frac{(1 - \text{sen}\phi_e)(1 + \frac{2}{3}\text{sen}\phi_e)}{(1 + \text{sen}\phi_e)}$	Obteve uma relação para o parâmetro K para o caso do produto em repouso (estado elástico) e parede lisa e rígida
Walker	$K = \frac{1 + \text{sen}^2\phi_e - 2\sqrt{\text{sen}^2\phi_e - \mu_w^2 \text{cos}^2\phi_e}}{4\mu_w^2 + \text{cos}^2\phi_e}$	Assumindo que o produto ensilado está em ruptura e, simultaneamente, está deslizando ao longo de uma parede rugosa, usou a geometria do círculo de MOHR para incluir o coeficiente de atrito com a parede.
Hartmann	$K = \frac{1 - \text{sen}^2\phi_e}{1 + \text{sen}^2\phi_e}$	Apresentou a formulação baseada na teoria da elasticidade para silos de paredes rugosas

Frazer	$K = \frac{1}{\frac{1+\text{sen}^2\phi_e}{\text{cos}^2\phi_e} + \frac{2\text{sen}\phi_e}{\text{cos}^2\phi_e} \sqrt{1 - \frac{\text{tg}^2\phi_w}{\text{tg}^2\phi_e}}}$	Deriva sua expressão por meio da consideração do equilíbrio das forças no contorno (na superfície da parede), para o estado de ruptura incipiente.
Aoki	$K = \left[1 + 2\text{tg}^2(\phi_e) + \frac{\sqrt[4]{1 + 2\text{tg}^2(\phi_e)}}{3\mu_w^2} \cdot \left\{ \text{tg}^3(\phi_e) - (\text{tg}^2(\phi_e) - \mu_w^2)^{\frac{2}{3}} \right\} \right]^{-1}$	Deriva sua expressão da hipótese de Walters (1973a) e conclui utilizando a sua expressão na formulação de Janssen (1895), os valores de pressões são iguais aos obtidos por Walters (1973a).

Fonte: Cheung (2007)

Cheung (2007) ainda ressalta os diversos fatores que influenciam na determinação do fator K, como por exemplo, as propriedades físico-químicas do produto granular, a forma e as dimensões do silo, o tipo de fluxo do produto durante a descarga do silo, o efeito do tempo e os parâmetros térmicos e de umidade, e a interação entre a estrutura do silo com o produto granular.

As normas internacionais utilizam-se destas equações como proposta para a definição do valor de K. A norma AS 3774:1996 utiliza a teoria de Walker, e a norma DIN 1055-6:2005 utiliza equação própria, observado na Equação 3. As normas também possuem tabelas próprias e métodos de ensaio para avaliação das propriedades físicas para diversos produtos.

$$K = 1,2 \cdot (1 - \text{sen}\phi_e) \quad (3)$$

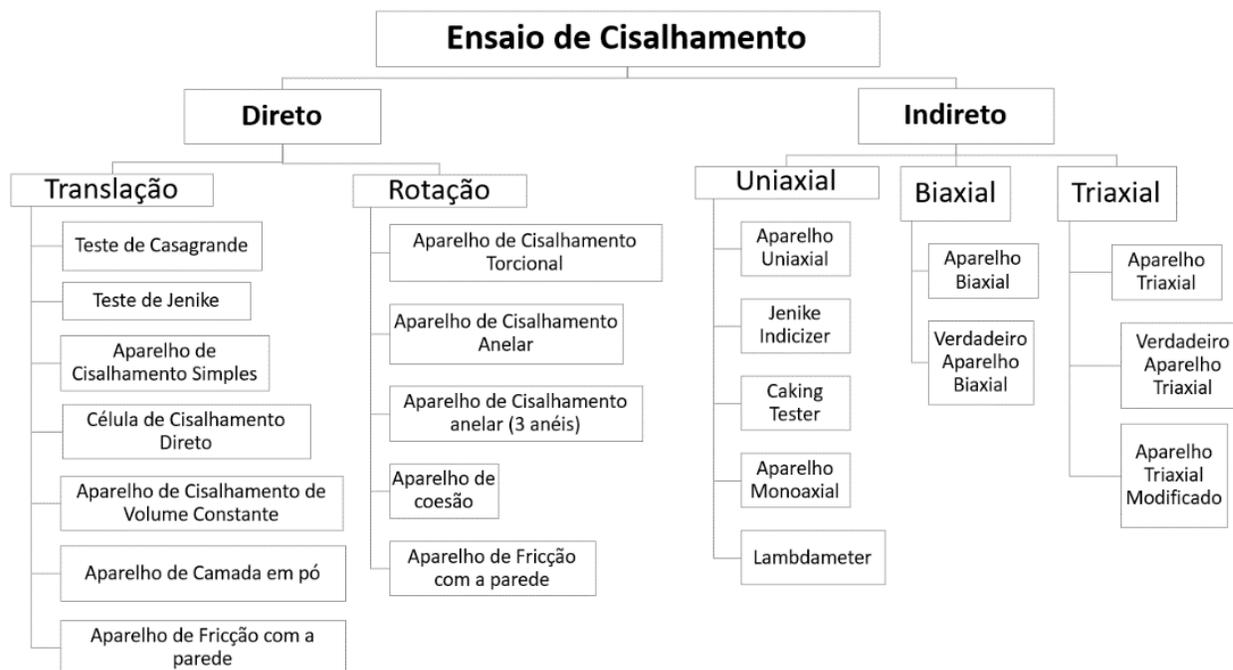
Devido a existência de diversas formulas para o cálculo de K e a inexistência de recomendações indicando qual a equação apresenta menor erro, em projetos, o ideal é que sejam feitos testes laboratoriais para a determinação das propriedades físicas, e adotar apenas uma norma para a obtenção de todos os valores.

2.7 Ensaio de cisalhamento

Algumas propriedades físicas são apropriadamente medidas por aparelhos de cisalhamento, podendo ser diretos ou indiretos. Schwedes (1996) comenta que os engenheiros de processos determinavam as propriedades de fluxo por aparelhos de cisalhamento utilizados no campo da

mecânica do solo, mas que estes dispositivos não podiam ser utilizados sem modificações. Na Figura 8 são citados alguns aparelhos que são utilizados na mecânica dos solos ou para produtos armazenados que são mencionados por Schwedes (2003).

Figura 8 - Aparelhos utilizados para ensaios de cisalhamento.



Fonte: Schwedes (2003)

Milani (1993) fez uma longa análise dos aparelhos e quais as vantagens e desvantagens de cada um (Quadro 3), e fazendo uma apreciação dos resultados, conclui que não há um aparelho universal para as medidas. Ele ainda cita que diversos autores realizaram comparações e indicaram que um dos aparelhos mais indicados é o Aparelho de Jenike, que traz resultados confiáveis das propriedades do fluxo do produto armazenado. Schwedes (2003) faz uma revisão dos testes para a medição das propriedades de fluxo do produto armazenado e afirma que o método mais conhecido e utilizado para projetar silos é o desenvolvido por Jenike, que é capaz de determinar o ângulo de atrito do produto, o efetivo ângulo de atrito do produto, o ângulo do produto com a parede e o efetivo ângulo do produto com a parede, e de distinguir os dois tipos de fluxo existentes, possibilitando que problemas de fluxo sejam evitados por meio do cálculo correto do silo.

Quadro 3 - Comparação direta dos ensaios de cisalhamento.

DETERMINAÇÕES	APARELHOS									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Ângulo de atrito interno	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ângulo de atrito com a parede	X	X	-	X	X	X	-	-	-	-
Tempo de consolidação	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Distribuição de tensões	X	X	-	X	X	-	-	-	-	-
Deformação homogênea	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X
Estado de tensão completo	-	-	X	-	-	-	X	X	X	X
Utilizável para materiais granulares grandes (>10mm)	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X
Utilizável para pequenas pressões (<1N/cm ²)	X	X	X	X	X	X	-	X	-	-
Tempo necessário p/ o ensaio	X	X	-	X	X	X	X	-	X	-
Manipulação do equipamento	X	X	-	X	X	-	X	-	X	-

Legenda: (A) Aparelho de Casagrande; (B) Aparelho de Jenike; (C) Aparelho de cisalhamento simples; (D) Aparelho de cisalhamento torcional; (E) Aparelho de cisalhamento anelar; (F) Aparelho de cisalhamento anelar; (G) Aparelho biaxial; (H) Verdadeiro aparelho biaxial; (I) Aparelho triaxial; (J) Verdadeiro aparelho triaxial. Fonte: Milani, 1993

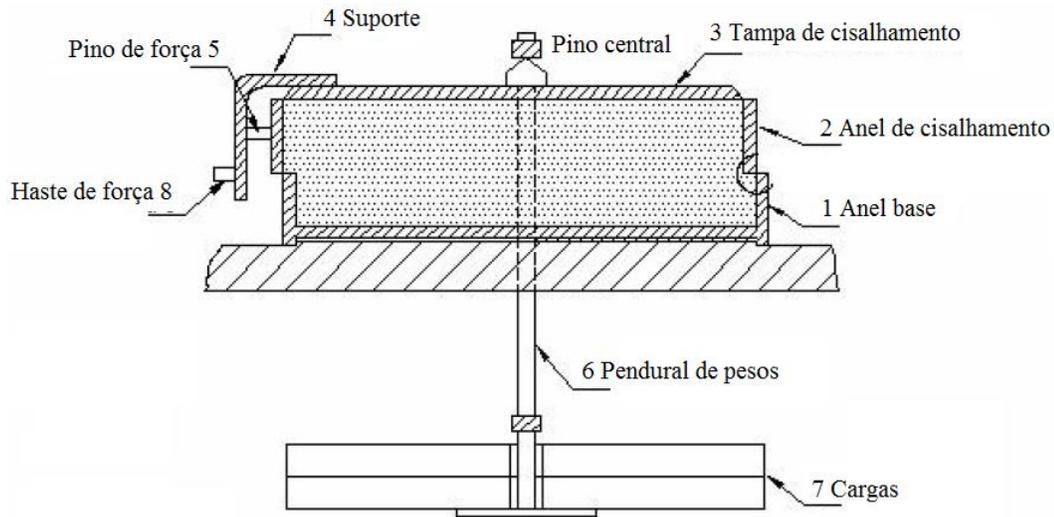
2.7.1 “Jenike Shear Cell”

Jenike apresentou seu teste e sua teoria acerca do fluxo dos produtos no início da década de 60, e desde então foi bastante estudado e discutido (MILANI,1993; SCHWEDES 2003; LOPES NETO et al., 2009b; LOPES NETO et al., 2013)

O procedimento correto para realizar o teste é minuciosamente descrito por Milani (1993) e pela norma ASTM D 6128 (2013). Esta esclarece que o aparelho pode ser utilizado para medir a força de coesão dos sólidos a granel durante o fluxo contínuo e, após o período de armazenamento, não sendo indicado para partículas elásticas e que o uso mais comum do aparelho é para o projeto de silos e para obtenção de parâmetros para projetos de equipamentos especializados. O aparelho fornece valores confiáveis para tais usos.

O aparelho de Jenike é ilustrado na Figura 9. Sendo composto da base (1), anel de cisalhamento (2), tampa de cisalhamento (3), suporte da tampa (4) e o pino de força (5).

Figura 9 - Célula de Jenike na posição inicial *off-set*.



Fonte: Milani, 1993.

2.7.2 “Powder Flow Tester” (PFT)

Com o avanço da tecnologia de computadores e da criação de *softwares* é possível encontrar no mercado um aparelho de cisalhamento mais moderno, o equipamento de Análise de Fluxo de Pó, PFT na sigla em inglês, fabricado pela Brookfield. A empresa trabalhou com o Wolfson Center for Bulk Solids Handling Technology da Universidade de Greenwich na Inglaterra, buscando aplicar os ensaios tradicionais de cisalhamento com o avanço da tecnologia, simplificando e possibilitando a aplicação do teste na indústria. Seu funcionamento é embasado na metodologia da Célula de Cisalhamento, com os padrões admitidos pela norma ASTM 6128. O equipamento consegue medir o comportamento de fluxo de materiais sólidos a granel que possuem partículas com o tamanho médio de 1 mm, podendo chegar até 2 mm. O equipamento fornece dados de densidade aparente, curva de fluxo, ângulo de atrito interno e de parede, diâmetro de arco coesivo e de “rat hole” além do cálculo do ângulo da tremonha.

O equipamento mede as propriedades por intermédio de um aumento das forças de compactação da amostra e depois aplica sobre esta uma força de cisalhamento. Quem controla a operação do equipamento é o próprio *software*, que fornece os dados detalhados em formato de gráfico e ou em tabelas. Visualiza-se o equipamento na Figura 10.

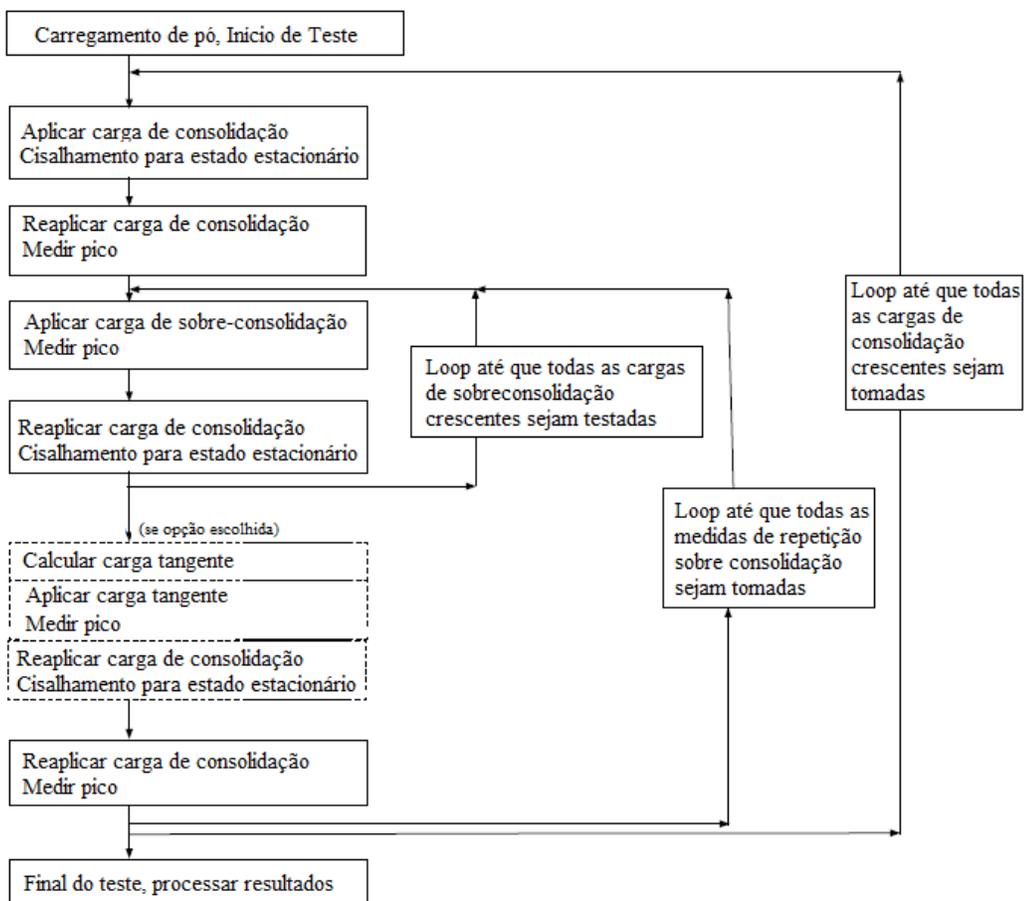
Figura 10- Aparelho de análise de fluxo de pó (PFT).



Fonte: BRASEQ, 2015.

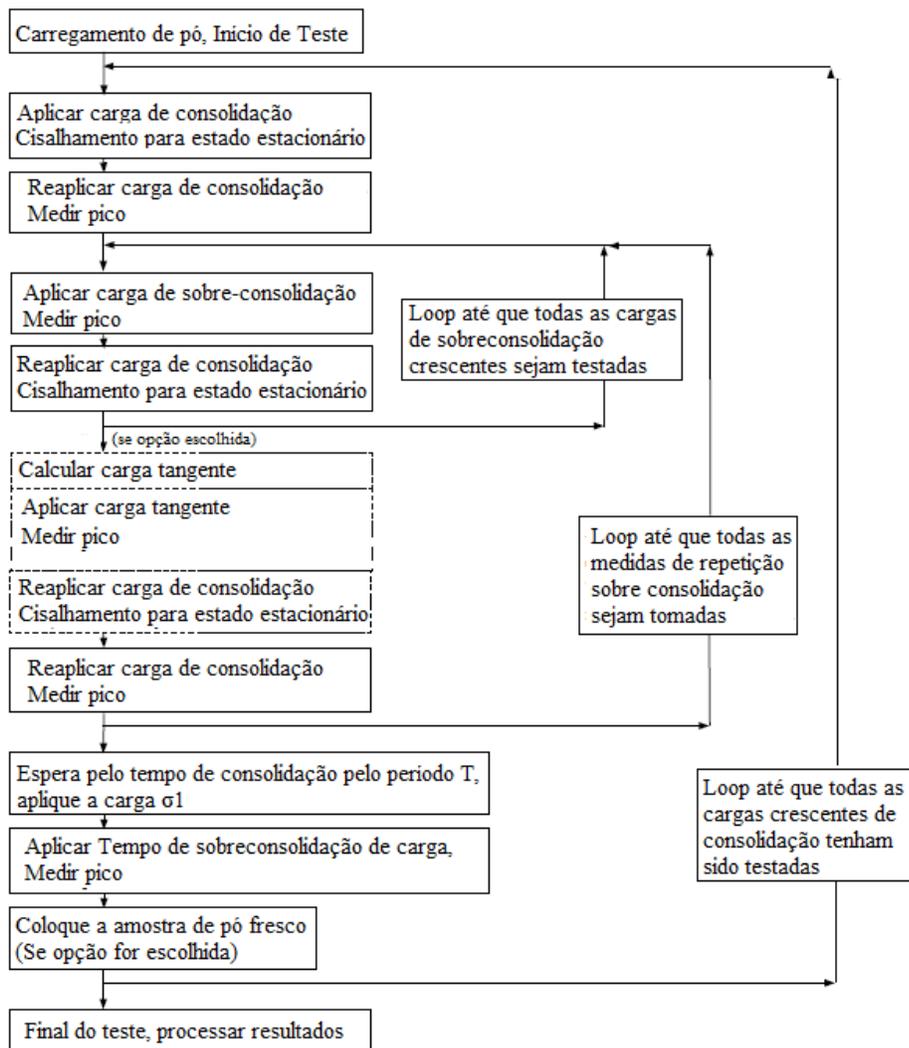
Após a devida preparação o ensaio é executado automaticamente pelo equipamento. Na tela de análise são mostrados os dados de teste de carga axial e os dados de teste de carga de torção. Os algoritmos que medem o pico de tensão torcional em estado estacionário têm funções de otimização incorporadas na análise de dados em tempo real. Observa-se os detalhes dos algoritmos utilizados no método de execução do aparelho para cada um dos 4 tipos de teste nas Figuras 11,12,13 e 14.

Figura 11 - Algoritmo de teste de Função de Fluxo.



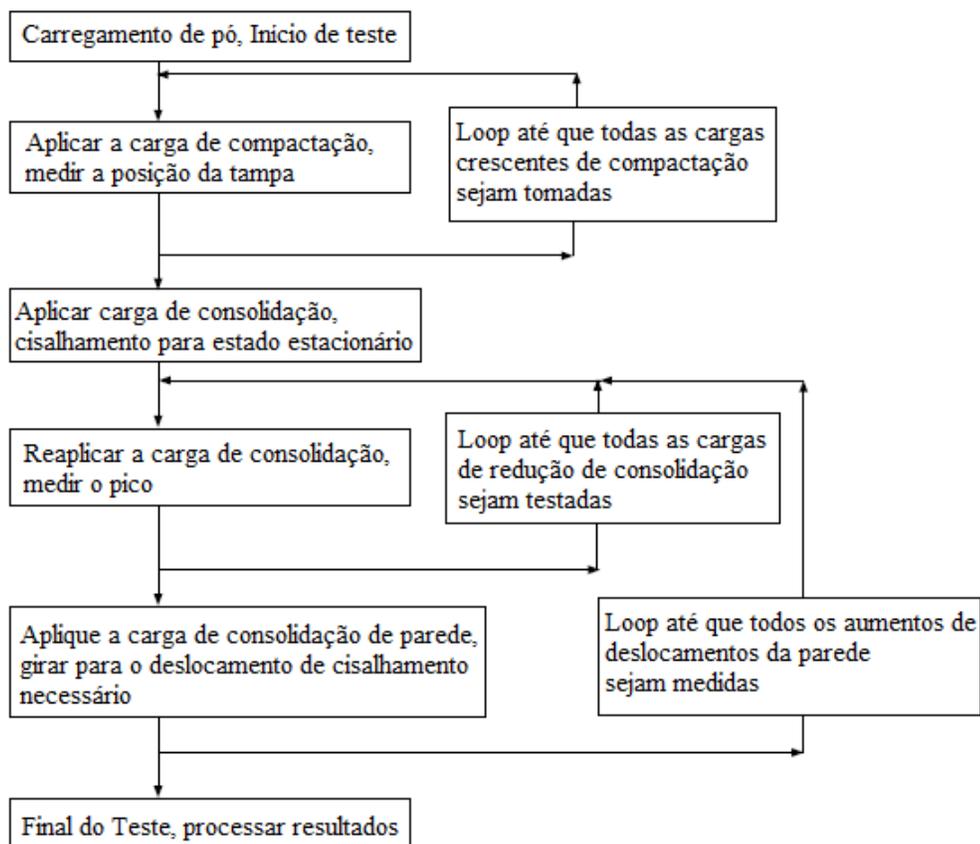
Fonte: BRASEQ, 2015

Figura 12 - Algoritmo da Função Fluxo com tempo de consolidação.



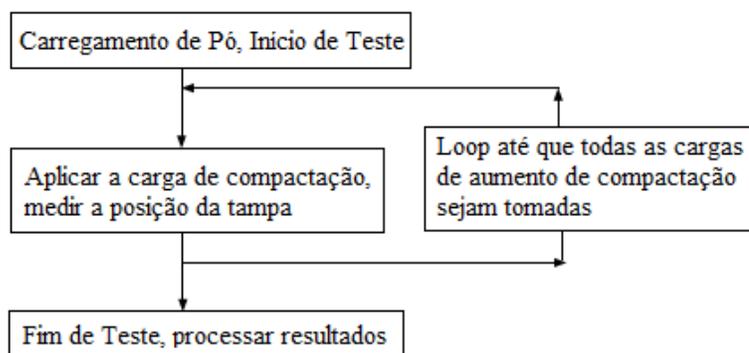
Fonte: BRASEQ, 2015

Figura 13 - Algoritmo de teste de atrito com a parede.



Fonte: BRASEQ, 2015

Figura 14 - Algoritmo do teste de densidade da amostra.



Fonte: BRASEQ, 2015

A sua aplicação para predição das propriedades físicas em alimentos tem se destacado, principalmente para comparação dos seus resultados com os testes já tradicionalmente estabelecidos.

Slettengren et al. (2016) fizeram uma avaliação de dois métodos, o aparelho “Powder Flow Tester” com o Teste de Anel de Cisalhamento do Dr. Dietmar Schulze (RST-XS), baseada na comparação da função de fluxo e na medição do efetivo ângulo de atrito interno, obtendo valores das propriedades físicas de cominho, orégano, cebola em pó e cebola granulada, estes pós representam componentes tipicamente utilizados em misturas de especiarias. O estudo conclui que nenhuma diferença significativa foi observada entre os dois métodos, com uma observação final que presumivelmente o PFT é o equipamento mais indicado para medições em tensões de consolidação até 5 kPa.

Crowley et al. (2014) realizaram um estudo apenas utilizando-se do aparelho “Powder Flow Tester” para obter as propriedades físicas e de fluxo, investigando as características físicas e propriedades de fluxo de sete pós de concentrado de proteína do leite devido ao conhecimento que a fluidez de um pó durante a descarga a partir de um silo depende, em grande parte, da composição e das propriedades físicas do pó, que são afetadas pela sua história de processamento e armazenamento. Os pós estudados foram descritos de acordo com a distribuição do tamanho da partícula e área específica da superfície, assim como a densidade da massa e a densidade das partículas. O PFT foi usado na análise de fluidez, no ângulo de atrito com a parede e a densidade a granel. E foi capaz de distinguir e apontar diferentes características físicas entre os pós, e estas afetaram negativamente o fluxo, indicando paredes de tremonhas mais íngremes e diâmetros maiores.

2.8 Estudos realizados

Os estudos realizados com o café visam aferir a qualidade dos grãos com relação a todas as etapas da cadeia produtiva do café. A qualidade dos grãos de café é fator determinante do preço e na aceitação do produto no mercado internacional. Na fase de pós colheita a qualidade do grão pode ser influenciada pelo beneficiamento e pela secagem e pode ser mantida pela armazenagem.

Para a fabricação de máquinas e equipamentos que atendam às necessidades de segurança no trato do café é de suma importância que se tenha o conhecimento das propriedades físicas do produto, entretanto atualmente existem poucos estudos que forneçam estes dados, sendo quase inexistentes tanto para o grão de café quanto para o café moído. Na literatura há uma diversidade de pesquisas para outros produtos agrícolas que servem como embasamento para uma metodologia adequada de estudo que encaminhe para o conhecimento das propriedades físicas do café.

Jenike (1980) em um boletim intitulado “Storage and Flow of fluids” da Universidade de Utah fez um esboço sobre as teorias de fluxo e forneceu as informações necessárias para projetar um silo com fluxo livre ou em canal. E, principalmente, apresenta o seu aparelho, um teste de cisalhamento direto para produtos armazenados com uma bancada de consolidação de tempo. A proposta do teste é medir o eficiente ângulo de atrito, a função fluxo, a densidade, o ângulo cinemático de atrito entre o sólido e a parede e o ângulo estático de atrito interno do produto.

Silva (1993) em sua tese de Doutorado intitulada “Estudo da Variabilidade de Pressões em Silos” enfatizou a análise da variabilidade das propriedades físicas dos produtos armazenados e a variabilidade das pressões.

Milani (1993) em sua tese de Doutorado intitulada "Determinação das Propriedades de Produtos Armazenados para Projeto de Pressões e Fluxo em Silos" realiza uma grande revisão de ensaios para a determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados e apresenta uma metodologia de ensaio utilizando o aparelho "Jenike Shear Cell" utilizando de dois tipos de produtos armazenados, um pulverulento (farinha de trigo) e outro granular (colza).

Silva (2003) em sua tese de Doutorado intitulada “Propriedades físicas dos grãos de café como subsídio em projetos de equipamentos e de silos utilizando a metodologia de Jenike” determinou as propriedades físicas (ângulos e coeficientes de atrito estático e dinâmico com a parede, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno e massa específica aparente) dos grãos de café, variedades Catuaí-Vermelho e Conillon, e comportamento deste produto em função do teor de umidade, do tempo de consolidação e dos diferentes materiais de parede, utilizando-se do equipamento de Jenike..

Cheung (2007) em sua tese de Doutorado intitulada “Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos” teve como

objetivo realizar um estudo abrangente das pressões exercidas pelo produto em silos verticais esbeltos com teorias já existentes, utilizando para tal as propriedades físicas da soja, do milho e da ração de frango obtidas experimentalmente por meio do ensaio no “Jenike Shear Cell”. Os resultados mostraram que os modelos de pressões estudados podem ser utilizados para o cálculo das pressões com as variabilidades dos parâmetros representadas pela distribuição lognormal.

Crowley et al. (2014) em seu artigo na revista *Journal of Food Engineering* intitulado “Influence of protein concentration on the physical characteristics and flow properties of milk protein concentrate powders” determinou as características físicas e propriedades de fluxo de sete pós de concentrado de proteína do leite devido ao conhecimento que a fluidez de um pó durante a descarga a partir de um silo depende, em grande parte, da composição e das propriedades físicas do pó, que são afetadas pela sua história de processamento e armazenamento. Utilizando-se do “Powder Flow Tester” (PFT) para a análise de fluidez, determinou o ângulo de atrito com a parede e a densidade a granel.

Oliveira (2014) em seu artigo “Caracterização física de café após torrefação e moagem” trabalhou com a avaliação das mudanças das propriedades físicas de grãos de café torrados e moídos durante o armazenamento. Para obtenção destas propriedades o autor utilizou-se do aparelho “Jenike Shear Cell”, com a metodologia proposta por Milani (1993). Ao final, constatou-se que o nível de torrefação e granulometria alteram significativamente as propriedades físicas e de fluxo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados grãos de café, do tipo arábica, processados via seca (café natural) conforme Borém (2008) e beneficiados separando quanto à forma e o tamanho, com grãos imperfeitos sendo retirados da amostra. Estes foram torrados e moídos, e em seguida pôde-se determinar as propriedades físicas e de fluxo: ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito do produto com a parede, a função fluxo e o fator K.

A doação dos grãos de café, assim como a preparação destes para os ensaios foram feitas pelo Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas, localizado no Departamento de

Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA). A caracterização física das amostras foi realizada no Laboratório do QI Café - Polo de Tecnologia e Qualidade de Café e no Laboratório da Engenharia de Alimentos ambos na UFLA, Lavras – MG. Os testes para a determinação das propriedades físicas e de fluxo, utilizando-se do aparelho de cisalhamento transversal que utiliza a célula de Jenike, foram realizados no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM), localizado na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo, campus de São Carlos – SP. Os testes utilizando-se do aparelho de cisalhamento rotacional conhecido como “Powder Flow Tester” 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, Brasil.

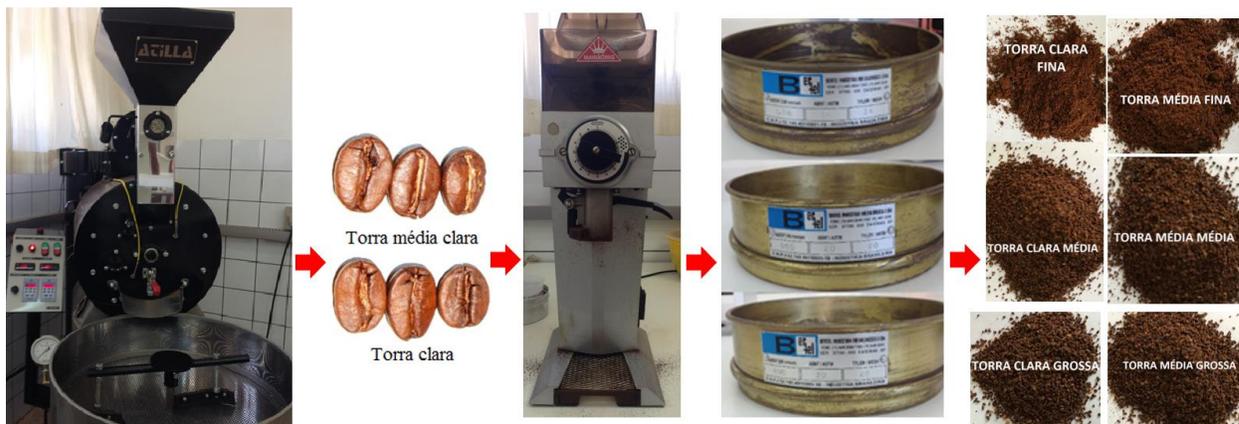
3.1 Preparação das amostras

A preparação das amostras iniciou-se com a torra dos grãos, utilizando-se um torrador de queima direta de gás GLP, com cilindro rotativo, com pré-aquecimento e capacidade de 5 kg de café cru. Desta forma foram obtidos dois padrões de amostra, sendo que o grau de cada torrefação dos grãos foi diferenciado com o acompanhamento e comparação da cor das amostras com o número padrão de cor Agtron. Dois graus de torra foram obtidos: a torra clara e a torra média clara, que são as indicadas segundo a norma ABIC (2017) para a comercialização de grãos de café torrados.

Após a torra, o café foi processado em um moedor de café Mahlkonig, em três granulometrias diferentes, conforme a recomendação da ABIC (2017), sendo: a granulometria fina (0,60 mm), a granulometria média (0,85 mm) e a granulometria grossa (1,18 mm). A separação das granulometrias se deu por meio de peneiras granulométricas com malhas fabricadas seguindo as normas da ABNT.

Após o processo de torra e da separação por granulometria, foram obtidos seis tipos de amostra de café torrado e moído: torra clara granulometria fina, torra clara granulometria média, torra clara granulometria grossa, torra média granulometria fina, torra média granulometria média, torra média granulometria grossa (Figura 15).

Figura 15. Preparação da amostra, etapas de torra e separação granulométrica.



Fonte: Do autor (2018)

A confirmação do número padrão da cor de Agtron foi realizado pelo equipamento Agtron M-Basic II, instalado no Laboratório do QI Café – Polo de Tecnologia e Qualidade do Café (Figura 16), sendo, respectivamente, 97,8 e 86,5.

Figura 16 – Aparelho Agtron M-Basic II.

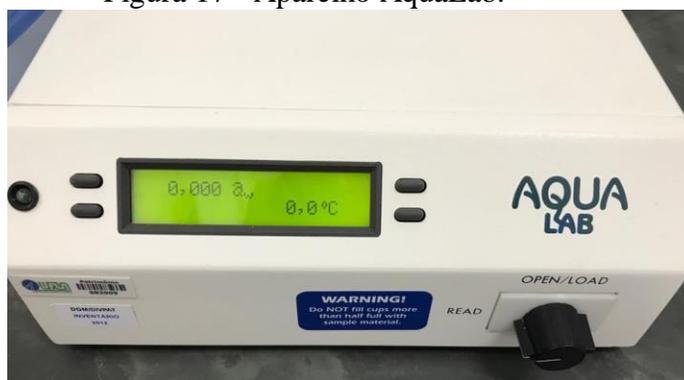


Fonte: Do autor (2018).

As amostras foram, então, armazenadas em embalagens plásticas de polietileno tereftalato (PET), pois estas são tidas como embalagem impermeáveis e que impedem trocas com o ambiente, podem ser utilizadas em um pequeno período para armazenamento de sementes (SILVA et al, 2010; BRITO CARDOSO et al, 2012)

A caracterização das amostras foi realizada pelo teste de atividade de água, realizados no Laboratório de Engenharia de Alimentos, Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), com o aparelho AquaLab Series 3TE da empresa Decagon (Figura 17).

Figura 17 - Aparelho AquaLab.



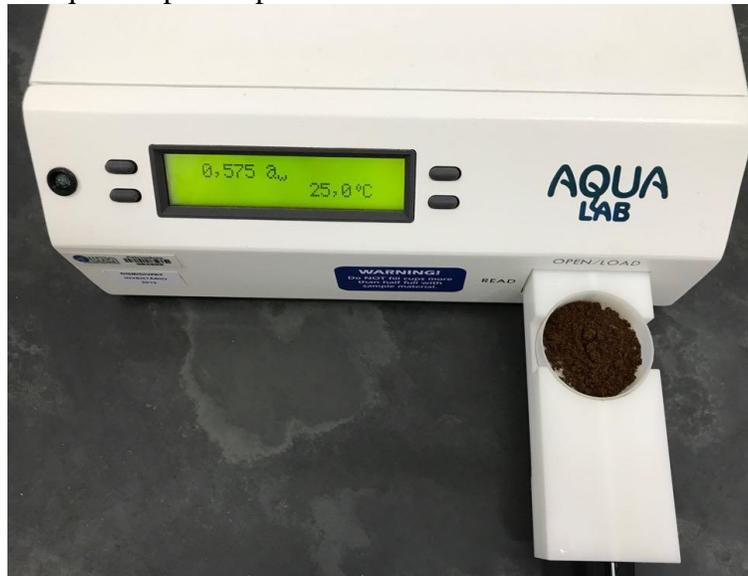
Fonte: Do autor (2018).

Para utilização do equipamento deve-se equiparar a temperatura da amostra com a de operação do aparelho, 25°C, durante os ensaios a sala permaneceu nessa temperatura. É importante que a amostra seja homogênea, que cubra completamente o fundo e que não ultrapasse a metade da altura da cápsula. Deve-se tomar cuidado para não contaminar o interior do aparelho, mantendo a parte externa das cápsulas limpas. O tempo médio das leituras é de cinco minutos.

Com a amostra preparada, o processo de utilização do equipamento é simples. Com o botão da gaveta na posição OPEN / LOAD pode-se puxar a gaveta para abrir, esta possui um local para depositar a cápsula com a amostra. Deve-se fechar cuidadosamente a gaveta, para evitar contaminação. Deve-se então girar o botão para a posição READ, o aparelho então sela a cápsula com a câmara e dá-se início a um ciclo de leitura. Este ciclo continua até que a taxa de mudança de três leituras consecutivas seja inferior a 0,0005 uma da outra. Quando o ciclo de leitura é finalizado é obtido um resultado final, a atividade de água é exibida na tela do aparelho, acompanhado de um sinal sonoro. Deve-se então girar o botão para a posição LOAD/OPEN, onde a gaveta poderá ser aberta e uma nova leitura ser feita.

Primeiramente foi realizado a calibração do equipamento com água destilada, e depois, para eliminar qualquer umidade que interferisse na leitura do equipamento foi feita uma leitura com sílica desidratada azul em gel. Após esse procedimento foi possível realizar os ensaios. O material café em pó foi depositado no centro das cápsulas e as leituras realizadas. Para cada amostra foram feitas três repetições, sendo que a média das três determinações foi o valor considerado. Na Figura 18 pode-se visualizar a amostra pó de café depositada na cápsula e pronta para a leitura no aparelho.

Figura 18 - Aparelho AquaLab pronto para o teste com a amostra de café torrado e moído.



Fonte: Do autor (2018).

3.2 Ensaios de cisalhamento

3.2.1 Jenike Shear Cell

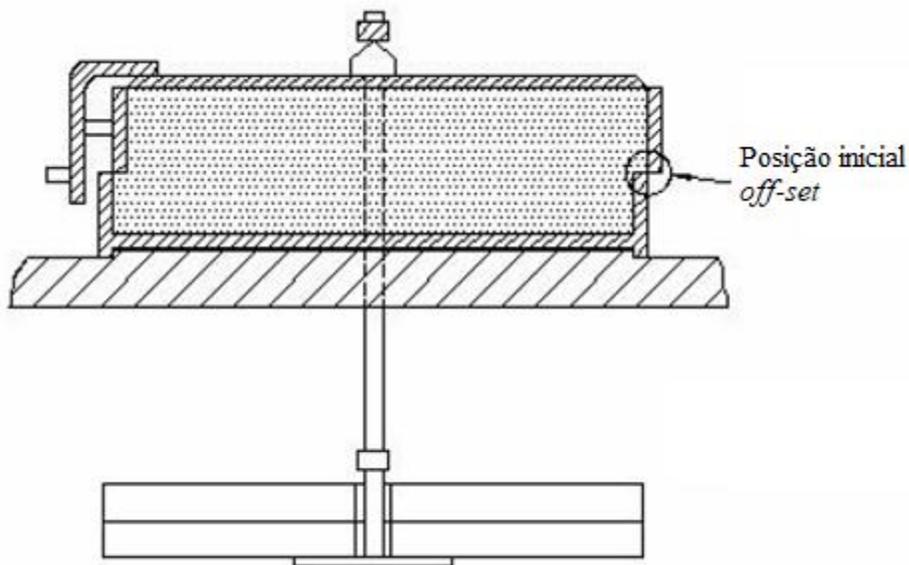
Com o intuito de obter as propriedades físicas e de fluxo foi realizado o ensaio de cisalhamento direto por translação na máquina TSG 70-140 construída com base no aparelho de “Jenike Shear Cell”. Os ensaios utilizaram a metodologia empregada por Milani (1993), com o auxílio de um técnico treinado e constaram dos ensaios de cisalhamento da amostra, e o da amostra com dois tipos de parede: aço liso e aço rugoso.

A proposta desenvolvida por Milani (1993) consiste na operação de *twist*, que tem como objetivo a preparação da consolidação crítica da amostra, na operação de pré-cisalhamento (*pre-shear*), cujo objetivo é desenvolver uma zona de cisalhamento dentro do qual ocorra fluxo de estado estável, e na operação de cisalhamento (*shear*).

Para estas operações, a amostra é colocada dentro do anel de cisalhamento, sendo seu excesso raspado e nivelado. Então o anel de cisalhamento é fechado com a tampa de operação de rotações, onde seguindo a indicação de Jenike (1979) são aplicadas o número de 30 rotações da alavanca do aparelho, realizando a operação conhecida como *twist*.

Para o início da operação de pré-cisalhamento, a tampa de rotação é trocada pela tampa de cisalhamento e colocada sobre a superfície. O anel é então colocado na posição *off-set*, como ilustra a Figura 19 e uma força vertical F_v é aplicada à tampa, e juntamente as partículas no interior do anel por meio do pendural de pesos (6) e as cargas (7). Então uma força horizontal é aplicada mecanicamente ao suporte por meio da haste de força (8), que é acionada mecanicamente e transmite a força à uma velocidade constante de $2,72 \text{ mm min}^{-1}$. A etapa de pré-cisalhamento termina quando as paredes do anel de cisalhamentos estão alinhadas.

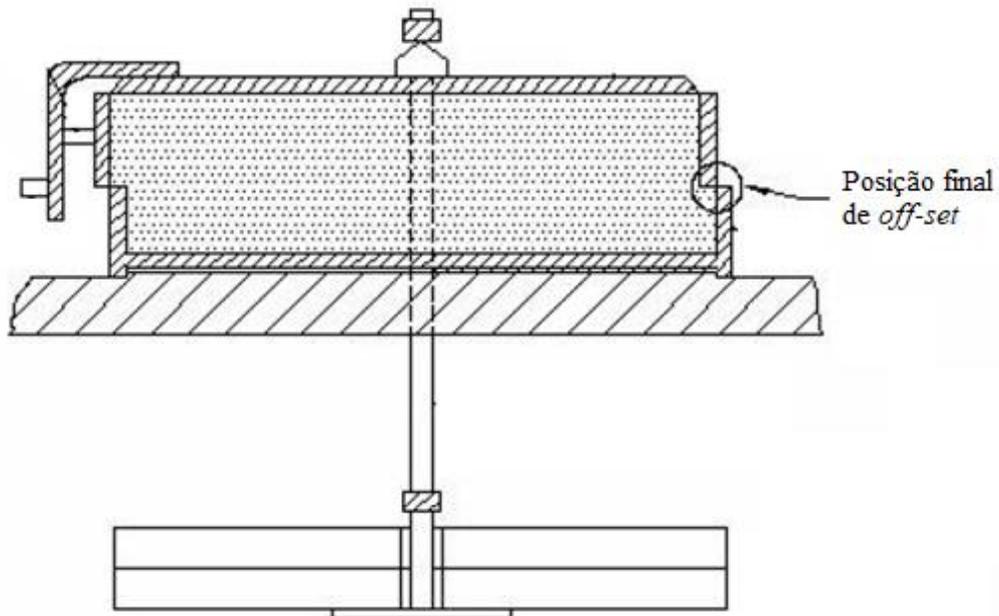
Figura 19 - Célula de Jenike na posição inicial de *off-set*.



Fonte: Milani, 1993.

Depois dá-se o início a operação de cisalhamento, fazendo-se a troca do peso vertical e retomando o movimento da força horizontal, até a posição final de *off-set*, como ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Célula de Jenike na posição final *off-set*.

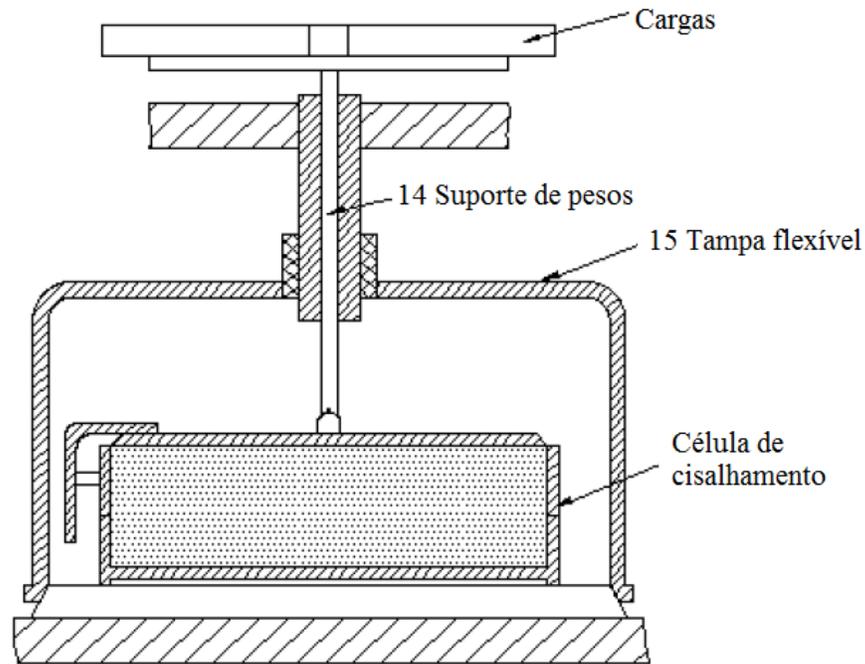


Fonte: Milani, 1993.

Além da célula de cisalhamento, o aparelho completo inclui um transdutor de força que mede a força de cisalhamento F_s , um amplificador e um gravador, um motor para a haste de medição de força, uma chave de torção, um cabide de carga, uma bancada de consolidação, um acessório para a configuração com placas de material de parede e um dispositivo de calibração. O transdutor deve ser capaz de medir uma força de 500 N com precisão de 0,1%.

A bancada de consolidação consiste em várias estações para testes de tempo de consolidação, esta é ilustrada na Figura 21. A estação é equipada com um suporte de peso (14) em que os pesos podem ser colocados, e ainda uma tampa flexível (15) para limitar a célula de teste e evitar qualquer influência do meio ambiente, como efeitos de evaporação ou umidificação durante o tempo de consolidação.

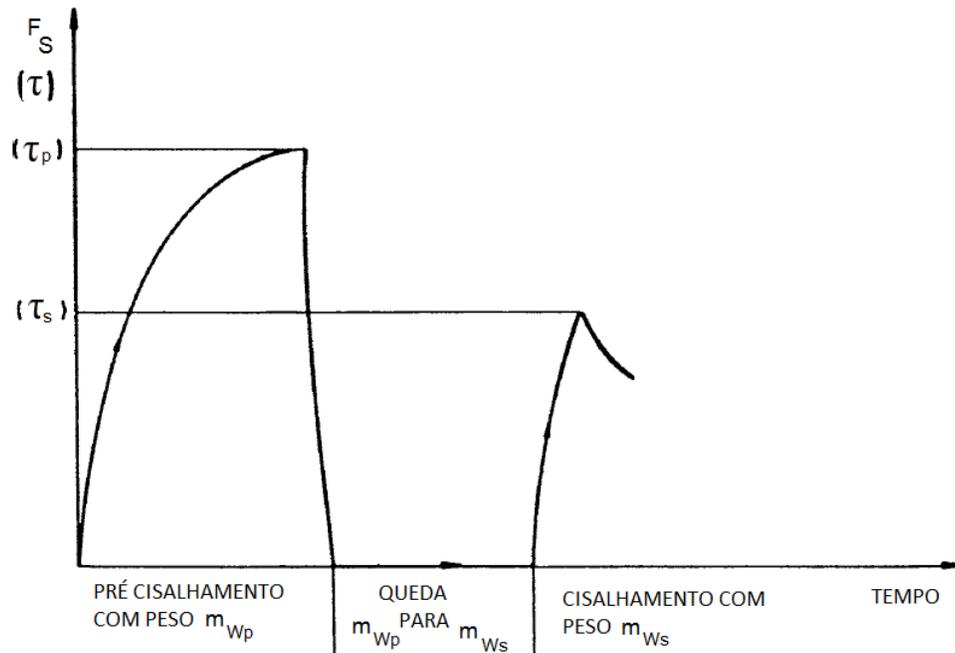
Figura 21 - Bancada de consolidação.



Fonte: Milani, 1993.

Num primeiro momento é feita a preparação do material sobre a célula, o enchimento deve ser feito de maneira uniforme, em pequenas camadas horizontais do material, assegurando-se que não haja espaços vazios e que o excesso do material será removido com o auxílio de uma lâmina. O teste de cisalhamento é feito em duas etapas. A primeira é a preparação da amostra para a obtenção da consolidação crítica, conhecido como pré-shear, por meio da torção e do pré-cisalhamento da amostra com uma seleção das cargas para desenvolver uma zona de cisalhamento dentro da qual ocorra um fluxo de estado estável (MILANI, 1993). Tendo atingido essa condição de fluxo de estado estável, a haste de medida de força é retirada e a força de cisalhamento reduz a zero. As cargas são trocadas e o motor é novamente acionado e a força é medida na haste, essa aumenta rapidamente, indicando um valor máximo que representa a força de cisalhamento de deslizamento. Estas duas etapas podem ser visualizadas na Figura 22.

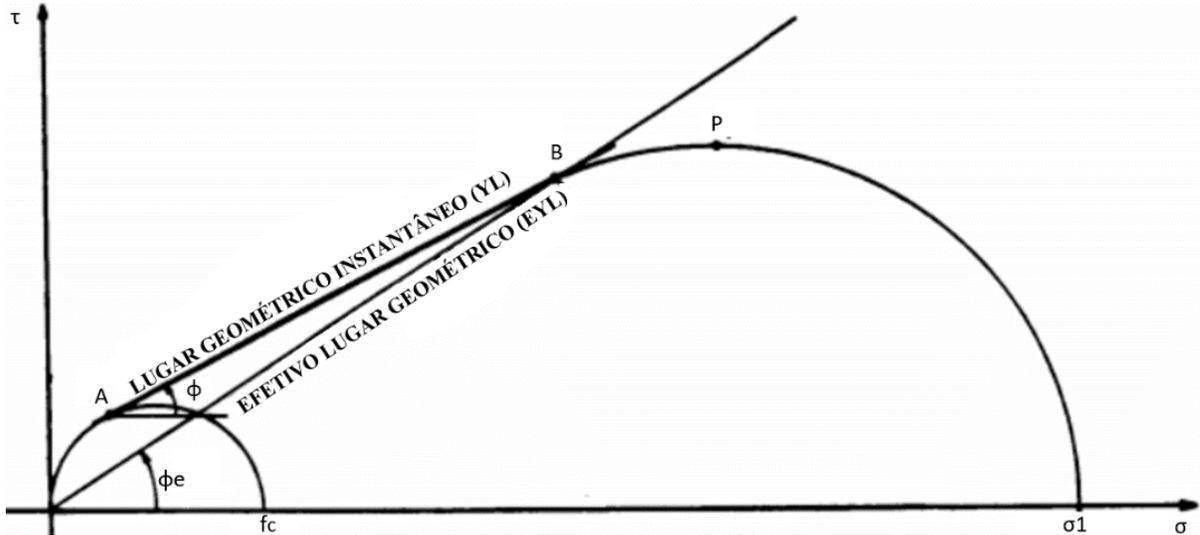
Figura 22 - Curvas de força-tensão: pré-cisalhamento (τ_p) e cisalhamento (τ_s).



Fonte: ASTM D 6128,2013.

São plotados os valores de tensão de pré-cisalhamento e de cisalhamento em um diagrama σ versus τ , onde é marcado o lugar geométrico, geralmente com um ponto de pré-*shear* e quatro pontos válidos de cisalhamento. O círculo de Mohr 1 (estado estável) é desenhado no ponto de pré-*shear* e tangencialmente ao lugar geométrico extrapolado. O círculo de Mohr 2 (resistência inconfina) é desenhado, passando pela origem e tangente ao lugar geométrico extrapolado. Como pode ser observado na Figura 23.

Figura 24 - Lugar geométrico (YL e EYL) e ângulos de atrito interno (ϕ e ϕ_e).



Fonte: Milani, 1993.

Para cada ponto medido é possível calcular a tensão normal (σ) e cisalhamento (τ) em estado estável, assim como a densidade (γ) do produto armazenado.

- a) Densidade do produto (daNm^{-3})

$$\gamma = \frac{W_t - (W_b + W_r + W_l)}{V_t} \quad (4)$$

- b) Tensões normais de pré-shear (σ_p) e shear (σ_s), (Nm^{-2})

$$\sigma_p = \frac{H + W_p + W_r + W_L + \gamma \cdot V_r}{A} \cdot g \quad (5)$$

$$\sigma_s = \frac{H + W_s + W_r + W_L + \gamma \cdot V_r}{A} \cdot g \quad (6)$$

$$\bar{\sigma}_p = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_p i}{n} \quad (7)$$

- c) Tensões de cisalhamento de pré-shear (τ_p) e shear (τ_s), (Nm^{-2})

$$\tau_p = \frac{F_{S_p}}{A} \cdot g \quad (8)$$

$$\tau_s = \tau \cdot \frac{\bar{\tau}_p}{\tau} \quad (9)$$

$$\bar{\tau}_p = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_p i}{n} \quad (10)$$

$$\tau = \frac{F_{SS}}{A} \cdot g \quad (11)$$

Quando se busca o conhecimento do tempo de consolidação, o ensaio é bem parecido. O teste é realizado com o auxílio da bancada de consolidação. Realiza-se a primeira etapa, a amostra é preparada e pré-cisalhada, de forma normal. Depois as células de cisalhamento são transferidas para a bancada de consolidação, com o cuidado de utilizar uma cobertura impermeável sobre cada célula para prevenir variações de umidade, e então são carregadas com uma carga W_t , diretamente sobre a tampa ou sobre o pendural de cargas. Um intervalo de tempo é escolhido, e depois deste transcorrido, retorna-se a célula para o aparelho de cisalhamento, onde uma nova carga é selecionada e o teste de cisalhamento é realizado normalmente (MILANI,1993).

A caracterização da curva do Yield Locus foi realizada com três configurações diferentes, variando as cargas sobre o pendural de pesos no *shear* e pré-*shear*, por meio de quatro ensaios. Os níveis de carga normais utilizados nestes ensaios estão listados na Tabela 2.

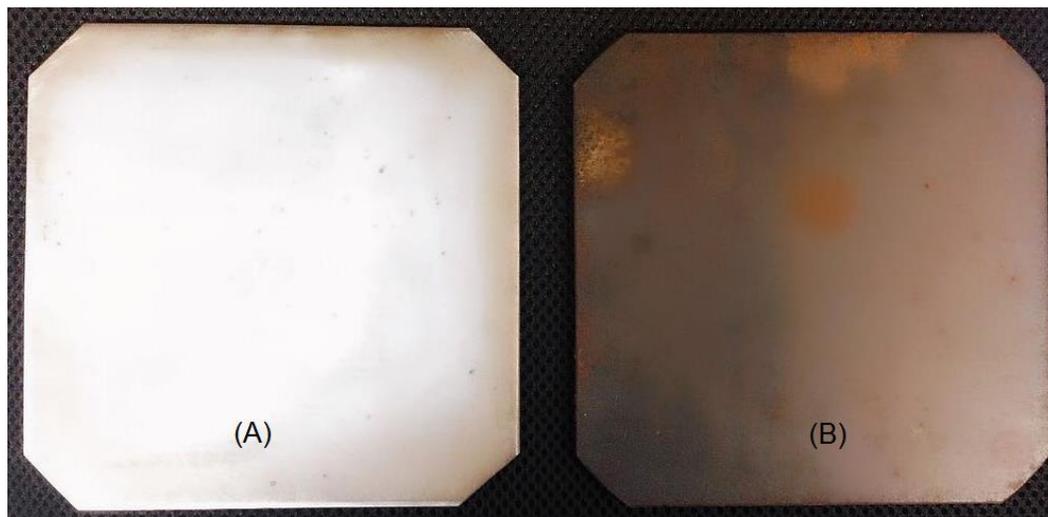
Tabela 2 - Níveis de cargas normais utilizadas no aparelho “Jenike Shear Cell”.

YL 1		YL2		YL3	
WP (N)	WS (N)	WP (N)	WS (N)	WP (N)	WS (N)
100	70	70	50	50	35
100	50	70	35	50	20
100	35	70	20	50	10

Fonte: Do autor (2018).

O ângulo de atrito com a parede pode ser medido substituindo-se a base da célula de cisalhamento pela amostra de dois diferentes materiais, aço liso e aço rugoso, como o visto na Figura 25. O produto é então cisalhado sobre a amostra do material, sob diferentes tensões normais: 50; 40; 30; 20; 10 e 0 N e os valores das tensões de cisalhamento foram medidos.

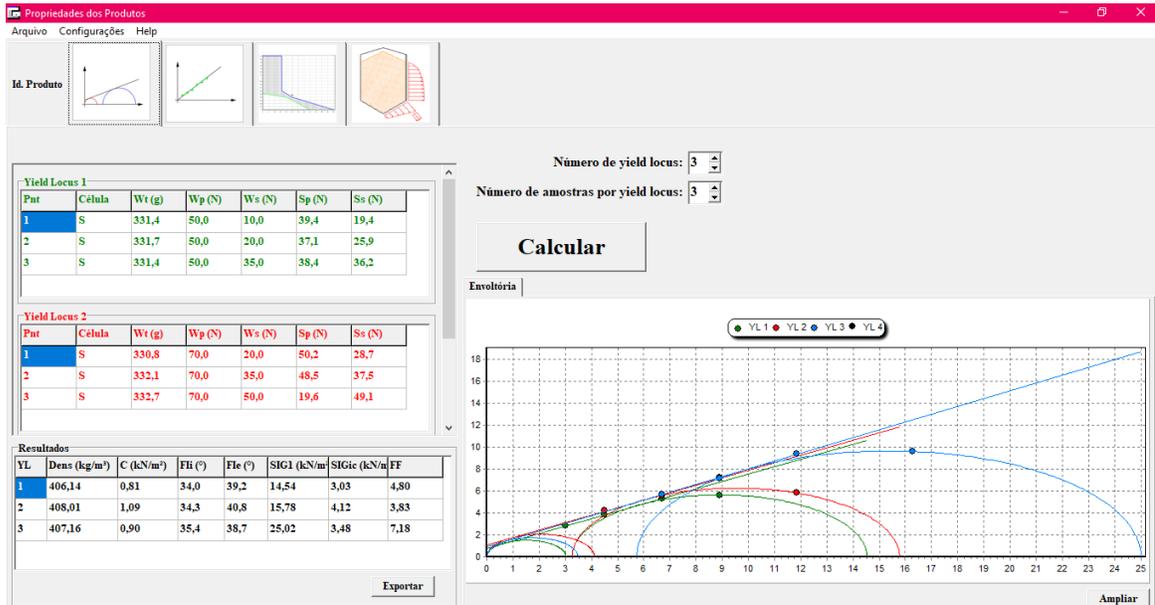
Figura 25 - Paredes utilizadas na célula de cisalhamento. (A) Aço liso; (B) Aço rugoso.



Fonte: Do autor (2018).

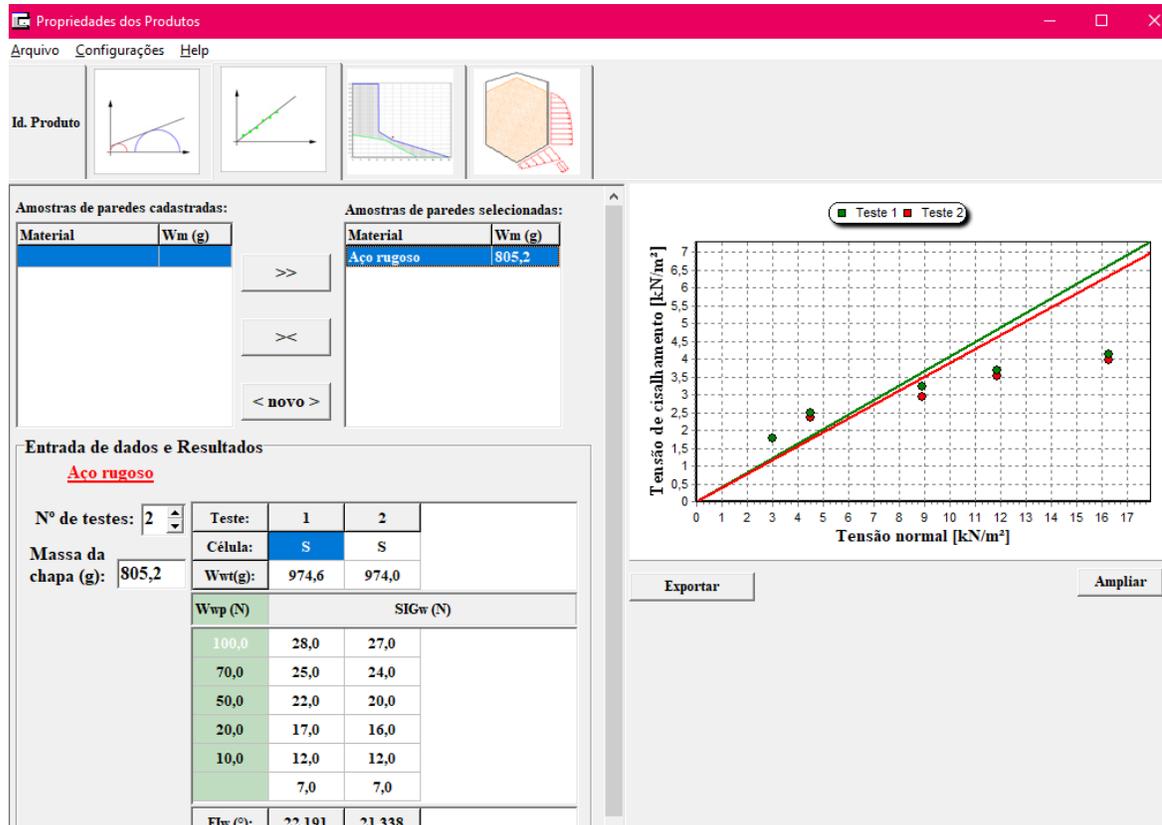
O aparelho fornece os resultados de força pelo deslocamento. Utilizando-se de um *software* desenvolvido no LaMEM foram realizadas as construções dos círculos de Mohr, e foram determinados os seguintes parâmetros: densidade da amostra, coesão, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, tensão principal, tensão inconfineda, função fluxo e o ângulo de atrito com a parede. A seguir pode-se observar a interface do *software* para o cálculo das propriedades e do ângulo de atrito com a parede na Figura 26 e Figura 27, respectivamente.

Figura 26 - Interface do *software* utilizado para o cálculo das propriedades.



Fonte: Do autor, 2018.

Figura 27 - Interface do *software* utilizado para o cálculo do ângulo de atrito com a parede.



Fonte: Do autor, 2018.

3.2.2 “Powder Flow Tester” (PFT)

As propriedades físicas e de fluxo de produtos pulverulentos com diâmetro de partícula de até 2 mm foram obtidas no aparelho “Powder Flow Tester” (PFT) (Figura 28). Os ensaios de cisalhamento baseados na norma ASTM – D – 6128 (2013) e requer sequencias simples de configuração do sistema para obtenção das propriedades necessárias.

Figura 28 - Aparelho “Powder Flow Tester” do LACRA.



Fonte: Do autor, 2018.

A amostra foi posicionada na bandeja (Figura 29) e com o auxílio de uma lâmina própria, após corretamente distribuída e uniformizada. Foi informado como dado de entrada a massa do produto a ser introduzido na bandeja obtido pelo peso da bandeja com o produto, considerando que a balança já deve estar com o desconto do peso da bandeja.

Figura 29 - Bandeja para cisalhamento do produto.



Fonte: Do autor (2018).

Na Figura 30 observa-se as peças que compõem a célula de cisalhamento rotacional do aparelho PFT e dois tipos de anéis que devem ser utilizados, um para a obtenção das propriedades de fluxo e um para os ensaios de atrito com a parede.

Figura 30 - Peças do aparelho “Powder Flow Tester”. (a) Peças que compõem a célula de cisalhamento rotacional. (b) Anel 1 (anel de cisalhamento na opção Função Fluxo); Anel 2 (anel de atrito com a parede).



Fonte: Do autor, 2018.

A bandeja foi posicionada no aparelho e foi selecionado um programa pré configurado, neste caso, o “Quick Flow Function Tester” que permite em um ensaio de 14 minutos obter todas

as propriedades de fluxo do produto analisado, composto por uma sequência de até oito cargas distintas estipuladas pelo aparelho, sendo a carga máxima de 4,819 kPa. Na tela principal do *software*, ao selecionar a opção “Run Test” é dado início ao ensaio. Há uma movimentação da tampa, que desce para uma posição ligeiramente acima da amostra na bandeja, e feita uma autocalibração, para depois a tampa descer até entrar em contato com a amostra e o ensaio começar efetivamente. A qualquer momento durante o ensaio pode-se observar, na tela principal, a exibição detalhada da etapa do ensaio. Quando o teste estiver concluído a tampa levantará um pouco da amostra e aparece na tela "Test Complete". Foram utilizados os dois tipos de tampa fornecidos pelo aparelho

O teste foi executado automaticamente até a conclusão. O *software* do aparelho forneceu os dados de tensão calculados e os dados em gráficos. Para cada amostra foram realizados três ensaios.

3.3 Determinação das propriedades

O aparelho “Jenike Shear Cell” assim como o “Powder Flow Tester” possuem *softwares* específicos que fornecem gráficos de Círculos de Mohr e os dados para a obtenção dos valores do ângulo de atrito interno (ϕ_i), efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e), ângulo de atrito do produto com a parede ($\phi_{w,c}$), os valores da resistência inconfiada (σ_{ic}) e da tensão principal de consolidação (σ_1) para determinação da Função Fluxo, os valores de tensão de consolidação (σ_1) e a tensão (σ_1') atuando onde um arco estável imaginário para a determinação do fator fluxo da tremonha.

Para a determinação do fator K foi utilizada a equação da norma DIN 1055-6:2005 (Equação 3).

Para a análise estatística foi adotado o delineamento inteiramente casualizado (DIC), visto que o mesmo grão foi preparado e separado em amostras diferentes totalmente ao acaso. Para cada aparelho (Jenike e PFT) e ensaio (Atividade de água) foram realizadas três repetições. Os resultados apresentados representam as médias de cada amostra e para verificar se houve diferença entre as amostras foi aplicado o teste de Scott-Knoot a 5% de probabilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Atividade de Água

Na Tabela 3 são listados os valores de atividade de água para as diferentes condições de torra e granulometria.

Tabela 3 - Valores médios de atividade de água em dois níveis de torra e três granulometrias diferentes.

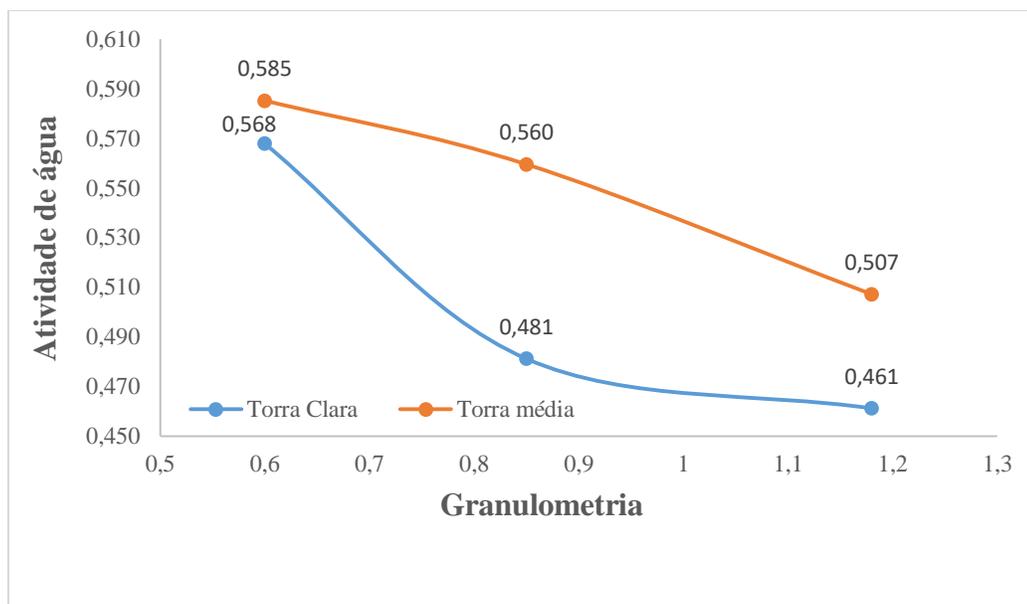
Amostra		Atividade de água
Torra	Granulometria	
Clara	Fina	0,568 c
	Média	0,481 a
	Grossa	0,461 a
Média	Fina	0,585 c
	Média	0,559 c
	Grossa	0,507 b
CV (%) = 2,36		

* Médias seguidas por uma mesma letra, na coluna, não diferem entre si, pelo teste Scott Knott (5% de significância).

Estes valores indicam para todas as amostras que a qualidade da água ligada presente no alimento é moderada. Ferreira Neto et al (2005) esclarecem que a maioria dos microrganismos cresce em meio com atividade de água superior a 0,9, em leveduras e fungos em atividade de água superior a 0,88 e para produtos desidratados os valores de atividade de água para os organismos microbianos é superior ao de 0,6. Dessa forma, os valores encontrados são inferiores, revelando-se valores seguros para o armazenamento e posterior comercialização das amostras.

Pode-se observar que a interação entre o nível de torrefação e granulometria interferem diretamente na atividade de água. Para a torra clara foi verificado que a granulometria implica em diferenças significativas entre as atividades de água das amostras avaliadas. E para a torra média não se observa diferenças significativas dos valores de atividade de água entre as granulometrias. Com a construção do gráfico observado na Figura 31, verifica-se que, de modo geral, quanto maior a granulometria, menor o valor de atividade de água.

Figura 31 - Gráfico da atividade de água em função da granulometria dos níveis de torra das amostras.



Fonte: Do autor, 2018.

As amostras de café com torrefação clara apresentam menores valores de atividade de água quando comparadas com a torrefação média. Em estudo realizado por Oliveira et al. (2014) os resultados são inversos, os autores explicam que quanto maior o grau de torrefação, há uma maior perda da massa de produto e por conseguinte uma maior evaporação da água do produto. Com relação à granulometria, observa-se um aumento da atividade de água para granulometrias mais finas. Pimenta et al. (2009) afirmam que é comum menores valores de atividade de água, para cafés torrados e moídos, justificado pelo processo de torrefação, pois há liberação de CO_2 , águas e substâncias voláteis durante a moagem.

Com relação ao aumento da atividade de água com o aumento da granulometria o mesmo foi apreciado por Oliveira et al. (2014). Estudos anteriores como o de Silva et al. (2013) ilustram que granulometrias menores levam a maiores atividades de água. O resultado oposto encontrado no presente trabalho pode ser explicado devido às amostras passarem pelo processo de torrefação, onde ocorrem reações de pirólise que implica em menores valores de atividade de água.

4.2 Propriedades físicas

Nos ensaios com o “Jenike Shear Cell” e o “Powder Flow Tester” obtiveram-se os gráficos de tensão normal *versus* tensão de cisalhamento com os semicírculos de Mohr, onde se pode determinar, com o auxílio de software específico de cada equipamento as propriedades físicas, estes podem ser observados no Apêndice A e Apêndice B, respectivamente.

Foram determinadas, como propriedades físicas, a densidade da amostra (ρ), coesão (C), o ângulo de atrito interno (ϕ_i), o efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e), a tensão principal de consolidação (σ_1) e a resistência inconfina (σ_{inc}). Os valores médios das propriedades, para cada amostra, para cada ensaio são listados na Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 4 - Propriedades físicas e de fluxo obtidas pelos ensaios no “Jenike Shear Cell”.

Amostra		Densidade (kgm ³)	Coesão (kNm ⁻²)	Øi (°)	Øe (°)	σ ₁ (kNm ⁻²)	σ _{inc} (kNm ⁻²)
Torra	Fina	407,1 b	0,933 b	34,5 a	39,5 a	18,44 a	3,54 b
Clara	Média	365,1 a	0,036 a	37,4 a	35,5 a	22,94 a	0,16 a
	Grossa	359,3 a	0,256 a	34,7 a	36,0 a	20,55 a	0,95 a
Torra	Fina	402,6 b	1,316 b	29,4 a	35,7 a	18,6 a	4,49 b
Média	Média	355,7 a	0,493 a	33,9 a	36,7 a	21,48 a	1,76 a
	Grossa	353,1 a	0,663 a	35,8 a	38,7 a	21,80 a	1,96 a
CV (%)		1,17	61,56	8,97	4,98	29,01	57,99

* Médias seguidas por uma mesma letra, na coluna, não diferem entre si, pelo teste Tukey (5% de significância).

Tabela 5 - Propriedades físicas e de fluxo obtidas pelos ensaios no “Powder Flow Tester”.

Amostra		Densidade (kgm ³)	Coesão (kNm ⁻²)	Øi (°)	Øe (°)	σ ₁ (kNm ⁻²)	σ _{inc} (kNm ⁻²)
Torra	Fina	402,4 b	0,309 b	33,2 a	46,7 c	2,47 b	1,14 c
Clara	Média	393,4 a	0,078 a	34,4 b	37,8 a	2,30 a	0,29 a
	Grossa	403,3 b	0,095 a	35,5 c	39,0 b	2,43 b	0,36 b
Torra	Fina	398,2 a	0,306 b	33,1 a	46,4 b	2,48 b	1,12 c
Média	Média	391,6 a	0,070 a	34,4 b	37,7 a	2,25 a	0,26 a
	Grossa	412,8 b	0,085 a	34,7 b	38,5 c	2,38 b	0,33 b
CV (%)		1,32	6,27	0,96	0,66	1,96	5,88

* Médias seguidas por uma mesma letra, na coluna, não diferem entre si, pelo teste Tukey (5% de significância).

A densidade e a coesão das amostras tendem a diminuir de acordo com o aumento da granulometria, com exceção apenas para a densidade na torra clara granulometria grossa no ensaio com o PFT. Este comportamento também foi observado por Shulze (2008), Oliveira et al. (2014) e Lee e Yoon (2015) que destacaram que a densidade é fortemente ligada a tensão de consolidação, defendendo que um sólido de partículas finas, quando comparado à um sólido com partículas grossas, terá um aumento de densidade. Não é possível estabelecer diferença entre os níveis de torra e os valores apresentados.

Para o ângulo de atrito interno ao se comparar a granulometria é possível observar um aumento do valor, com exceção apenas no ensaio de Jenike para a torra clara granulometria média. Oliveira et al. (2014) expuseram que amostras com maior atividade de água, desenvolvem uma maior força de coesão entre as partículas que compõem a massa, tendendo a aglutinar essas partículas e, como resultado, aumentando o atrito interno. Com relação ao grau de torra quase não há diferenciação entre os valores de atrito interno, mas observa-se valores um pouco maiores para a torra clara.

Com relação aos valores do efetivo ângulo de atrito interno não observa-se uma tendência de aumento ou diminuição de acordo com a granulometria, e encontra-se valores muito próximos com relação ao grau de torra, para as amostras de torra média, observa-se um valor quase estável e para as amostras de torra clara, observa-se uma redução do ângulo de acordo com o aumento da granulometria. O fato é elucidado pelo mesmo motivo do ângulo de atrito interno. Oliveira et al. (2014) obtiveram comportamento contrário, provavelmente pela pequena diferença entre as granulometrias e graus de torra que no referido estudo eram maiores.

Cheung (2007) evidencia que para produtos granulares o ângulo de atrito interno é aproximadamente igual ao efetivo ângulo de atrito interno. No presente estudo os valores foram bem diferentes, semelhante ao encontrado por Oliveira et al. (2014), muito provavelmente pelo fato da influência da forma das partículas.

Foi possível observar que para a tensão principal de consolidação (σ_1) os valores encontrados são discrepantes. No ensaio com o PFT os valores são inferiores aos encontrados no ensaio de Jenike, substanciando o que foi estudado por Slettengren et al. (2016), que embora tenha feito a comparação com o Teste de Anel de Cisalhamento do Dr. Dietmar Schulze (RST-XS), tenha apontado que o PFT é o mais indicado para medições em tensões de consolidação até 5 kPa. Com

relação ao comportamento, para ambos os ensaios, ao associarmos o grau de torra e a granulometria da amostra, não se pode definir uma tendência clara.

Com relação à resistência inconfina (σ_{inc}) não observa-se uma tendência de aumento ou diminuição de acordo com a granulometria. Com o ensaio de Jenike foram obtidos os maiores valores, de $4,49 \text{ kNm}^{-2}$ e $3,54 \text{ kNm}^{-2}$ para a torra media granulometria fina e torra clara granulometria fina, respectivamente. No ensaio com o PFT o maior valor foi de $1,14 \text{ kNm}^{-2}$ para a torra clara granulometria fina. Esta diferença dos valores entre os ensaios apresenta a mesma justificativa apresentada para a tensão principal de consolidação.

Para comparar os ensaios entre si é apresentada a Tabela 6, que apresenta novamente os valores de a densidade da amostra (ρ), coesão (C), o ângulo de atrito interno (ϕ_i), o efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e), a tensão principal de consolidação (σ_1) e a resistência inconfina (σ_{inc}).

Tabela 6 - Comparação entre as propriedades físicas e de fluxo obtidas pelos ensaios no "Jenike Shear Cell" e no "Powder Flow Tester".

Amostra		ρ (kgm ³)		C (kNm ⁻²)		ϕ_i (°)		ϕ_e (°)		σ_1 (kNm ⁻²)		σ_{inc} (kNm ⁻²)	
		Jenike	PFT	Jenike	PFT	Jenike	PFT	Jenike	PFT	Jenike	PFT	Jenike	PFT
Torra	Fina	407,1 c	402,4 c	0,933 b	0,309 a	34,5 a	33,2 a	39,5 a	46,7 b	18,44 b	2,47 a	3,54 b	1,14 a
Clara	Média	365,1 a	393,4 b	0,036 a	0,078 a	37,4 a	34,4 a	35,5 a	37,8 a	22,94 b	2,30 a	0,16 a	0,29 a
	Grossa	359,3 a	403,3 c	0,256 a	0,095 a	34,7 a	35,5 a	36,0 a	39,0 a	20,55 b	2,43 a	0,95 a	0,36 a
Torra	Fina	402,6 c	398,2 b	1,316 c	0,306 a	29,4 a	33,1 a	35,7 a	46,4 b	18,6 b	2,48 a	4,49 b	1,12 a
Média	Média	355,7 a	391,6 b	0,493 a	0,070 a	33,9 a	34,4 a	36,7 a	37,7 a	21,48 b	2,25 a	1,76 a	0,26 a
	Grossa	353,1 a	412,8 c	0,663 b	0,085 a	35,8 a	34,7 a	38,7 a	38,5 a	21,80 b	2,38 a	1,96 a	0,33 a
CV (%)		1,25		69,30		6,52		3,45		36,73		69,45	

* Médias seguidas por uma mesma letra, na coluna, não diferem entre si, pelo teste Tukey (5% de significância).

Após a análise estatística comparando os ensaios foi possível observar que: a densidade para a torra clara granulometria fina; a coesão para as torras clara e média com granulometria média e grossa; o ângulo de atrito interno para todas as amostras; o efetivo ângulo de atrito interno para a torra clara granulometrias fina e grossa, e torra media granulometrias grossa e média; e a resistência incondfinada para as torras clara e média e granulometrias média e grossa possuem valores estatisticamente iguais. Para a tensão principal de consolidação nenhuma amostra foi estatisticamente igual.

Não se pode afirmar que os valores obtidos com o Jenike foram superiores aos obtidos com o PFT, visto que para a densidade os valores obtidos com Jenike foram inferiores e o maior valor ($46,7^\circ$) para o efetivo ângulo de atrito interno foi encontrado para a torra clara granulometria fina obtido com o PFT. Em alguns casos, como o do ângulo de atrito interno, os valores entre os ensaios, embora se refiram a amostras diferentes, são próximos ($34,4^\circ$ e $34,5^\circ$).

A exceção surge apenas para a tensão principal de consolidação, onde o menor valor encontrado com o Jenike ($18,6 \text{ kNm}^{-2}$ para a torra média granulometria fina) é 7,5 vezes maior que o maior valor encontrado com o PFT ($2,48 \text{ kNm}^{-2}$ para a torra média granulometria fina). A diferença presumivelmente é pelas diferenças de pressões impostas durante os ensaios pelos aparelhos. Slettengren et al. (2016) elucidaram que o PFT é o mais indicado para medições em tensões de consolidação até 5 kPa, coerente com os valores obtidos que foram inferiores a este máximo.

Ao se comparar a coesão é importante destacar que o aparelho PFT obteve valores estatisticamente iguais, e que o aparelho de Jenike obteve valores diferentes, indicando que este é mais sensível em observar diferenças entre as amostras. Para o ângulo de atrito interno ambos os aparelhos não encontraram diferenças estatísticas entre as amostras e entre os aparelhos.

As normas internacionais de segurança propõem valores médios para algumas das propriedades físicas do produto, como o ângulo de atrito interno e o valor de K, entretanto, para café e pós de café não há valores definidos. Lopes Neto et al. (2017) utilizando do aparelho PFT para seis pós alimentícios encontrou valores diversificados das propriedades físicas e pôde compara-los com os valores fornecidos pela EUROCODE 1 Part 4 (European Standard, 2006), mesmo a norma tratando apenas farinha e trigo. Comparando a densidade com a tensão principal de consolidação, todos os pós analisados possuem um maior valor de densidade, o pó alimentício

com a densidade mais próxima ao café, de acordo com a densidade encontrada no presente estudo, seria a aveia em flocos. Este produto é exatamente o que se encontra fora da faixa recomendada pela norma, portanto dificultando a validação dentro da norma dos valores encontrados.

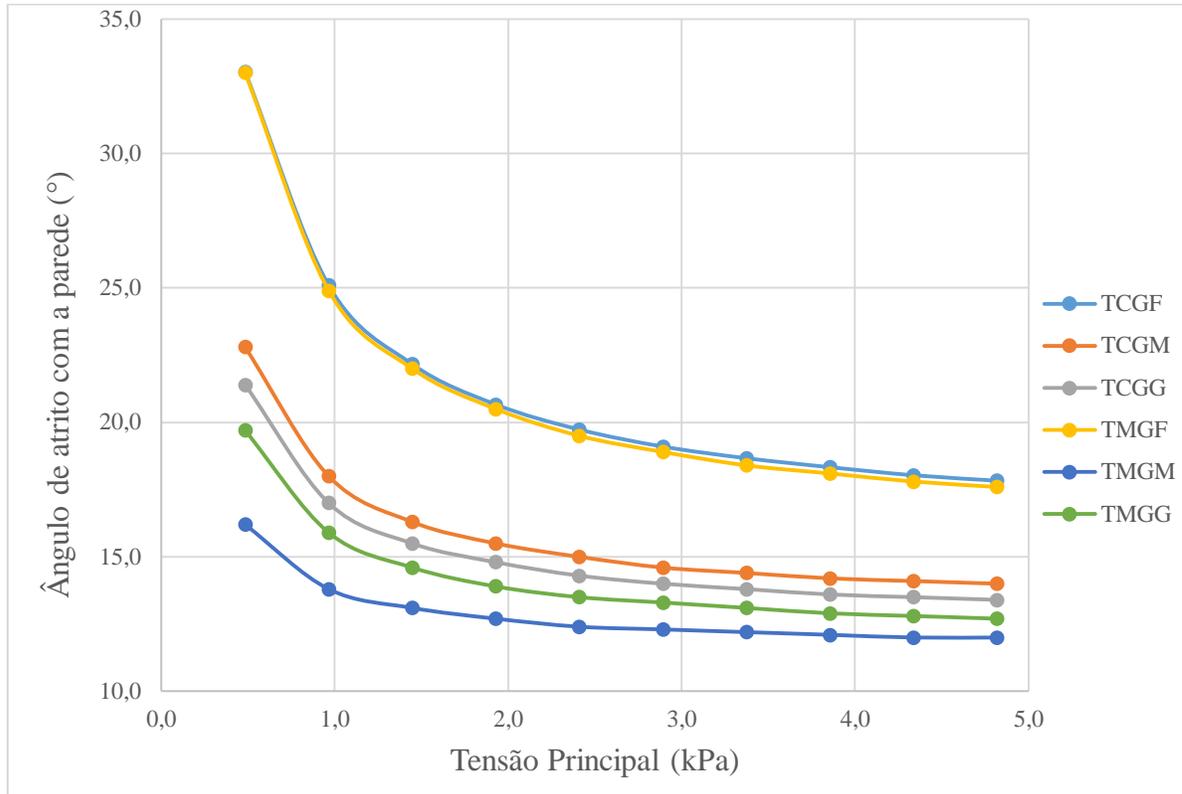
O ângulo de atrito com a parede também foi calculado pelos dois equipamentos. Na Tabela 7 encontram-se os valores obtidos nos ensaios com o aparelho de “Jenike Shear Cell” e na Figura 32 pode-se visualizar a relação existente entre o efetivo ângulo de atrito com a parede e a tensão normal obtida com o aparelho “Powder Flow Tester”.

Tabela 7 - Ângulo de atrito do produto com a parede obtido pelo aparelho “Jenike Shear Cell”.

Amostra		Ângulo de atrito (°)	
Torra	Granulometria	Aço liso	Aço rugoso
Clara	Fina	22,11 b	21,76 c
	Média	15,92 a	18,14 a
	Grossa	16,33 a	17,60 a
Média	Fina	21,14 b	22,40 c
	Média	16,59 a	20,46 b
	Grossa	17,44 a	20,98 b
		CV (%) = 4,42	CV (%) = 2,01

* Médias seguidas por uma mesma letra, na coluna, não diferem entre si, pelo teste Tukey (5% de significância).

Figura 32 - Gráfico do ângulo de atrito do produto com a parede *versus* tensão principal obtido com o “Powder Flow Tester”.



Legenda: (TCGF) torra clara granulometria fina; (TCFM) torra clara granulometria média; (TCGG) torra clara granulometria grossa; (TMGF) torra média granulometria fina; (TMGM) torra média granulometria média; (TMGG) torra clara granulometria grossa.

Fonte: Do autor (2018).

Ao se observar os resultados obtidos com o ensaio no “Jenike Shear Cell” pode-se considerar que para as torras claras foi observado um aumento do ângulo de atrito do produto com a parede, com os dois tipos de aços utilizados, com a diminuição do tamanho da granulometria. Este resultado está de acordo com o estudo de Fitzpatrick et al. (2004a) em estudos com leite e Lopes Neto et al. (2009b) com diferentes rações observaram que quanto menor o tamanho de uma partícula maior será o ângulo de atrito com a parede. Entretanto na torra média o mesmo comportamento não foi observado, a menor granulometria apresenta um maior ângulo de atrito do produto com a parede, mas as granulometrias média e grossa apresentam uma inversão, cabendo ressaltar que para o aço rugoso o valor é muito próximo. O ensaio de Jenike não estabeleceu diferenças estatísticas entre as torras com relação ao ângulo de atrito do produto da parede, e com

relação a granulometria não houve diferenças entre a média e grossa, apenas a granulometria fina apresentou maiores valores e estatisticamente diferente das demais.

No ensaio de PFT é simulado apenas um material, sendo possível observar um aumento do ângulo de atrito do produto com a parede com a diminuição do tamanho da granulometria, para os dois níveis de torra, semelhante aos estudos de Fitzpatrick et al. (2004a) e Lopes Neto et al. (2009b). Para ambas as torras e na granulometria fina os valores para ângulo de atrito interno são semelhantes, não sendo o aparelho capaz de diferenciar o nível de torra. Observa-se que para a granulometria fina possui valores bem superiores com relação às outras granulometrias. Para as outras granulometrias, a diferença de valores é bem pequena, mas não de forma significativa e são de forma geral menores.

Vale frisar que Fitzpatrick et al. (2004a) constituíram que não podem ser estabelecidas relações significativas entre as propriedades físicas de materiais particulados e o atrito com a parede, em razão da complexidade da interação entre as propriedades do material da parede e o pó estudado.

Considerando apenas o aço liso, por ser o mais indicado para produtos alimentícios, pode-se destacar que os valores encontrados com o “Jenike Shear Cell” variaram de 21,14 a 22,11°; 15,92 a 16,59° e 16,33 a 16,59°; respectivamente para a granulometria fina, média e grossa. Com o ensaio no PFT os valores variaram entre 17,8 a 33°; 12 a 22,8° e 12,7 a 21,4°; respectivamente para a granulometria fina, média e grossa. Observa-se que os valores encontrados com Jenike foram próximos entre si e os valores obtidos pelo PFT são mais amplos, começando com valores inferiores aos encontrados com Jenike. Utilizando-se do ensaio de Jenike, Oliveira (2013) encontrou valores variando entre 18,3 a 30°; 15,0 a 29,1° e 11,2 a 27,8°; respectivamente para o café moído fino, médio e grosso, novamente os valores provavelmente foram maiores, pois a diferença entre os graus de torra no referido estudo eram maiores. O autor explicita que durante a moagem há a quebra do produto em partículas menores de formatos distintos, aumentando a aderência ao material da parede, e por conseguinte um aumento no valor do ângulo de atrito do produto com a parede.

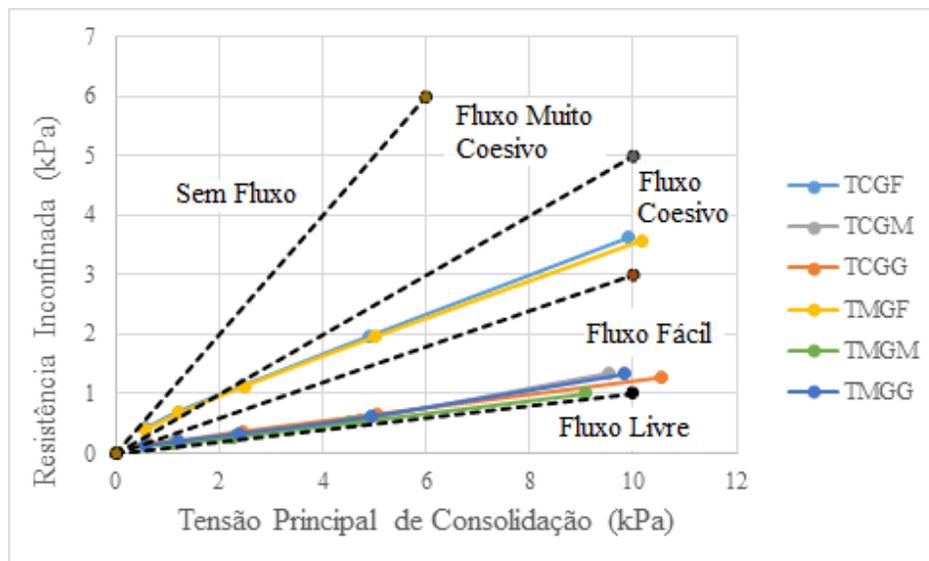
Pode-se ponderar que a granulometria fina, genericamente, possui valores superiores às outras. Indicando que em projetos de silos, ao calcular o ângulo de inclinação da tremonha, esta indicará maiores valores de inclinação desta para se obter fluxo de massa, quando utilizado o

gráfico fornecido pela AS 3774:1996 (Figura 7). Em projetos de tremonhas de seção retangular ou de seção circular, considerando as amostras com granulometria fina, não será possível obter fluxo de massa. Nas demais, a inclinação deverá ser entre 60 a 90° e 70 a 90°, respectivamente. Desde modo, a recomendação é que de acordo com a granulometria, e independente da seção da tremonha, com granulometrias finas é impossível obter fluxo de massa.

4.3 Função Fluxo

No ensaio com o “Jenike Shear Cell”, o *software* fornece os valores da Função Fluxo. No ensaio com o “Powder Flow Tester” esta foi definida plotando-se os pontos de resistência inconfiada *versus* tensão principal de consolidação. Na Figura 33 a Função Fluxo de cada amostra é assinalada e está localizada entre as funções que separam os tipos de fluxo em: fluxo livre, fluxo fácil, fluxo coesivo, fluxo muito coesivo e sem fluxo. Na Tabela 8 é possível observar a Função Fluxo dos dois ensaios para cada amostra.

Figura 33 - Função Fluxo determinada pelo aparelho “Powder Flow Tester”.



Legenda: (TCGF) terra clara granulometria fina; (TCFM) terra clara granulometria média; (TCGG) terra clara granulometria grossa; (TMGF) terra média granulometria fina; (TMGM) terra média granulometria média; (TMGG) terra clara granulometria grossa.

Fonte: Do autor (2018).

Tabela 8 - Função Fluxo obtida com os aparelhos “Jenike Shear Cell”, classificado de acordo com Jenike (1964), e “Powder Flow Tester”.

Amostra		Função Fluxo	
Torra	Granulometria	Jenike	PFT
Clara	Fina	4,8 (Coesivo)	Coesivo
	Média	92,01 (Fluxo Livre)	Fluxo Fácil
	Grossa	8,34 (Fluxo Livre)	Fluxo Fácil
Média	Fina	3,89 (Coesivo)	Coesivo
	Média	9 (Fluxo Fácil)	Fluxo Fácil
	Grossa	16,95 (Fluxo Livre)	Fluxo Fácil

Para os ensaios feitos com o aparelho “Jenike Shear Cell” comparou-se os valores fornecidos pelo *software* com a Quadro 1, retirada de Jenike (1964). Não é possível determinar qual tipo de fluxo ocorrerá em dependência do grau de torra, sendo possível distinguir diferentes fluxos de acordo com o granulometria. Para as torras clara e média granulometria fina o fluxo do produto é coesivo; para a torra média granulometria grossa o produto possui fluxo livre; para as demais amostras, o produto flui facilmente. Com exceção da torra clara granulometria média, podemos observar um valor distante do padrão. Isto deve-se ao fato do valor ser obtido pela Equação 1, e pelo valor da resistência inconfina inferior, assim como a coesão; entretanto eles não diferiram estatisticamente em relação às outras amostras.

O aparelho PFT conseguiu diferenciar dois tipos de fluxo o coesivo para as duas torras com granulometria fina e o de fluxo fácil para as duas torras com granulometrias média e grossa. Resultados coerentes com as apreciações feitas durante os ensaios experimentais. Destarte com os resultados dos dois aparelhos, pode-se afirmar que os valores da Função Fluxo decresceram assim como a granulometria, quanto mais pulverulento mais coesivo o produto e que o fluxo independe do grau de torra.

Diversos autores constataram o mesmo comportamento, Amagliani et al. (2016) que utilizaram o PFT com proteína de arroz em pó, e Oliveira et al. (2014) que também trabalhou com pós de café verificou que os valores da Função Fluxo diminuíram de acordo com a diminuição da granulometria, sendo que o tipo de moagem utilizada pelo autor foi o mesmo utilizado no presente trabalho e o mesmo tipo de fluxo foi encontrado. O referido autor, quando analisou o

comportamento da Função Fluxo com relação ao grau de torra, também encontrou ligeiras diferenças entre os graus de torra, e da mesma forma, a torra mais clara apresentou maiores valores.

Fitzpatrick et al. (2004a) destacou que mudanças de escoamento eram perceptíveis quando o tamanho das partículas diminui, pois há um aumento da área de contato entre as partículas, aumentando a interação entre as forças coesivas, entretanto poderia se esperar que o grau de torra influenciasse na Função Fluxo, pois em estudos com pó de leite (FITZPATRICK et al., 2004b) e em pós de soja (LEE, et al 2015) verificou-se que quanto maior o teor de gordura, maior a coesão, e por isonomia, menor valor de Função Fluxo. De acordo com a ABIC (2017) grãos muito torrados tornam-se oleosos, portanto, presume-se que os graus de torra utilizados não se diferem a ponto de influenciar no tipo de fluxo. Fitzpatrick et al. (2004b) ressaltou que embora o tamanho da partícula e a umidade afetem a capacidade de fluidez de um pó, não se pode relacionar a fluidez exclusivamente com base nessas propriedades.

4.4 Fator K

Na Tabela 9 estão listados os valores do fator K, que foi obtido utilizando a equação proposta pela norma DIN 1055-6:2005, foram utilizados apenas os valores de efetivo ângulo de atrito interno admitidos com os ensaios no aparelho “Jenike Shear Cell” e o “Powder Flow Tester” sem considerar os materiais de parede usados, baseado no exposto por Lopes Neto et al. (2009a) que a rugosidade do material da parede possui pouca influência na determinação de K.

Tabela 9 - Fator K obtidos a partir dos dados ensaiados nos aparelhos de “Jenike Shear Cell” e “Powder Flow Tester”.

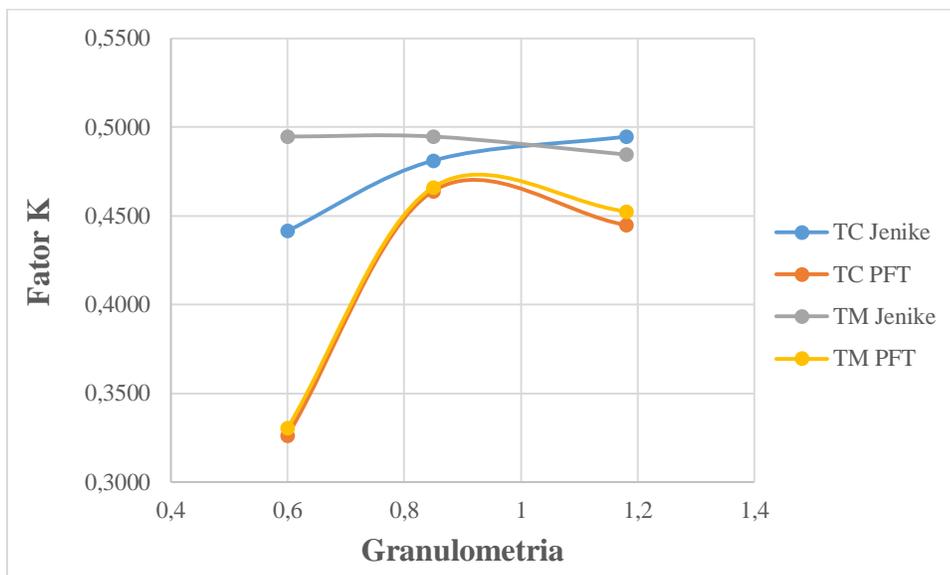
Amostra		Fator K	
Torra	Granulometria	Jenike	PFT
Clara	Fina	0,4416	0,3262
	Média	0,4812	0,4640
	Grossa	0,4947	0,4448
Média	Fina	0,4947	0,3306
	Média	0,4947	0,4662
	Grossa	0,4845	0,4525

Fonte: Do autor (2018)

Os valores do fator K, variaram entre 0,3262 a 0,4947, nos dois ensaios, sendo este maior valor encontrado em três amostras, a torra clara granulometria grossa e para as torras média granulometria fina e média com o “Jenike Shear Cell”. Oliveira (2013), utilizando-se do mesmo aparelho, obteve valores superiores, entre 0,4546 a 0,6484, encontrando inclusive uma tendência de aumento do valor do coeficiente com o aumento da granulometria. Essa diferença de resultados se deve basicamente pela diferença dos níveis de grau de torra e pelo fato das amostras analisadas por Oliveira (2013) terem sido armazenadas em duas temperaturas diferentes e analisadas durante seis meses, em cinco tempos distintos.

Na Figura 34 observa-se o comportamento do fator K, de acordo com o grau de torrefação e o aparelho utilizado para obtê-lo. O aparelho PFT forneceu dados quase idênticos para os dois graus de torra, e o aparelho de Jenike forneceu valores um pouco diferentes, mas com o mesmo comportamento para os dois graus de torra.

Figura 34 - Fator K em função da granulometria e do grau de torrefação e dos ensaios nos aparelhos “Jenike Shear Cell” e “Powder Flow Tester”.



Legenda: (TC) torra clara; (TM) torra média

Fonte: Do autor (2018)

Assim como o esperado, o fator K irá variar de acordo com o efetivo ângulo de atrito interno, visto que este é dependente dessa propriedade de fluxo. Portanto, da mesma forma que não há um padrão visível de aumento ou decréscimo com relação à granulometria para o ângulo de

atrito interno, não há um padrão para o fator K. Com relação ao grau de torrefação podemos perceber maiores valores para a torra média. A justificativa para tal comportamento é a mesma quando analisamos o efetivo ângulo de atrito interno.

Quando é feita a comparação dos aparelhos pode-se inferir que os valores obtidos com o aparelho “Jenike Shear Cell” são superiores, com relação ao fator K, sugerindo que para o projeto de estruturas de armazenamento estas requereriam que suportassem maior pressão. Em vista disso, os valores de k obtidos pelo aparelho indicam a confecção de projetos mais conservadores, quando comparado com o “Powder Flow Tester”. O aparelho de Jenike ofereceu valores diversificados entre as amostras com graus de torras diferentes, indicando que a torra clara possui maiores valores do fator K, presumivelmente por possuir, de acordo com este aparelho, maiores valores do efetivo ângulo de atrito interno. O aparelho PFT forneceu valores quase semelhantes para as amostras, independentemente do nível de torrefação.

5 CONCLUSÕES

O aparelho “Jenike Shear Cell” e o aparelho “Powder Flow Tester” forneceram as propriedades físicas e de fluxo das amostras. Ambos podem ser utilizados nos códigos normativos na estimativa das propriedades e pressões nas estruturas de armazenamento.

O ângulo de atrito interno apresentou o valor máximo de $36,6^\circ$ para a torra clara granulometria média no ensaio com o aparelho “Jenike Shear Cell” e de $35,5^\circ$ para a torra clara granulometria grossa no ensaio com o aparelho “Powder Flow Tester”.

O efetivo ângulo de atrito interno apresentou valor máximo de $39,2^\circ$ para a torra clara granulometria fina no ensaio com o aparelho “Jenike Shear Cell” e $46,73^\circ$ para a torra clara granulometria fina no ensaio com o aparelho “Powder Flow Tester”.

Nos ensaios com o Jenike e com o PFT os maiores valores encontrados para o ângulo de atrito do produto com a parede foi de $23,75^\circ$ e 33° para a torra clara granulometria fina respectivamente; e o menor valor de $17,55^\circ$ e $12,7^\circ$ para a torra clara granulometria grossa, respectivamente.

Para a Função Fluxo, em ambos os ensaios a granulometria fina para os dois graus de torra o fluxo é coesivo. No ensaio de Jenike a torra clara granulometria média e grossa e torra média granulometria grossa possui fluxo livre, a torra média granulometria média possui fluxo fácil. No ensaio com o PFT para ambas as torras e granulometrias média e grossa o fluxo é fácil.

Para o fator K no ensaio de Jenike o maior valor encontrado foi de 0,4947 para a tora clara granulometria grossa e para a torra media granulometrias fina e média. No ensaio com o PFT o maior valor encontrado foi de 0,4662 para a torra média granulometria média.

REFERÊNCIAS

AMAGLIANI, L., O'REGAN, J., KELLY, A. L., O'MAHONY, J. A. Physical and flow properties of rice protein powders. **Journal of Food Engineering**, v. 190, p. 1-9, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6128**: Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Cell. Philadelphia. 2013. 20p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. Tendências do mercado de cafés em 2017. Disponível em: <<http://abic.com.br/src/uploads/2018/05/2017.pdf>>. Acesso em: 02 de julho de 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. Norma de qualidade recomendável e boas práticas de fabricação de cafés torrados em grão e cafés torrados e moídos. Disponível em: <http://www.abic.com.br/publique/media/NMQ_LEGISLAcO_NORMAQUALIDADE.pdf>. Acesso em: 06 de março de 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. Indicadores da indústria de café no Brasil 2015. Disponível em: <<http://abic.com.br/estatisticas/indicadores-da-industria/indicadores-da-industria-de-cafe-2017/>>. Acesso em: 2 de julho de 2018.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3774**: loads on bulk containers. Sydney, 1996. 62p.

BARBOSA-CÁNOVAS, G.V.; VEJA-MERCADO, H.. Physical, chemical, and microbiological characteristics of dehydrated foods. **Dehydration of foods**. Springer US, 1996. p. 29-99, 1996.

BORÉM, F.M. **Pós-colheita do café**. Lavras, MG: UFLA/FAEPE, 2008. 102 p.

BRASEQ. **Importância da análise de pós**. Jarinu, SP. 2015. Disponível em: <http://www.braseq.com.br/produto_15/fluxo-de-particulas-finas-e-po-analisador-pft>. Acesso em: 18 de novembro de 2015.

BRITO CARDOSO, R. B.; BINOTTI, F. F. da S.; CARDOSO, E. D.. Potencial fisiológico de sementes de crambe em função de embalagens e armazenamento. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 3, p. 272-278, 2012.

BROOKFIELD ENGINEERING LABORATORIES. **Brookfield Powder Flow Tester - Operating Instructions. Manual No. M09-1200-E0914**.

CALIL JÚNIOR, C. **Sobrepresiones em las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos**. São Carlos-SP. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1984. 184p. (Apostila).

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

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

CAPFREE. **Capfree 25**, 2018. Disponível em: <<http://capfree.com.br/>>. Acesso em 12 de julho de 2018.

CARDELLI, C.; LABUZA, T. P. Application of Weibull Hazard analysis to the determination of the shelf life of roasted and ground coffee. **LWT - Food Science and Technology**, Filadélfia, v. 34, n. 5, p. 273-278, 2001.

CHEUNG, A. B. **Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos**. 2007. 333p. Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração: Engenharia de Estruturas) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CHEUNG, A. B. ; CALIL JUNIOR, C. . Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos. **Cadernos de Engenharia de Estruturas (Online)**, v. 11, p. 48-1-22, 2009.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira : café , v. 4 – Safra 2017, n. 4. Brasília, p. 88, dez. 2017

CROWLEY, S. V., GAZI, I., KELLY, A. L., HUPPERTZ, T., & O'MAHONY, J. A. Influence of protein concentration on the physical characteristics and flow properties of milk protein concentrate powders. **Journal of Food Engineering**, v. 135, p. 31-38, 2014

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. **DIN 1055-6**: Basis of design and actions on structures, part 6: design loads for buildings and loads in silo bins. Berlin, 2005. 195p.

EUROCODE 1 - ENV 1991- 4 Part 4 (1995). Actions on silos and tanks. Bruxelas

FERREIRA NETO, C. J.; FIGUEIREDO, R. M. F., QUEIROZ, A. J. M.. Avaliação sensorial e da atividade de água em farinhas de mandioca temperadas. **Ciênc. agrotec.** [online]. vol.29, n.4, pp.795-802, 2005.

FITZPATRICK, J. J.; BARRINGER, S. A.; IQBAL, T. Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology to the measured values. *Journal of Food Engineering*, v. 61, n. 3, p. 399-405, 2004.

FITZPATRICK, J.J., IQBAL, T., DELANEY, C., TWONEY, T., KEOGH, M.K. Effect of powder properties and storage conditions on the flowability of milk powders with different fat contents. **Journal of Food Engineering**, vol. 64, p. 435-444, 2004.

FONTANA JR, A. J. Measurement of water activity, moisture sorption isotherms, and moisture content of foods. **Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications**. Blackwell Publishing Professional: Ames, IA, USA, p. 155-171. p. 155-172, 2008.

GOMES, F.C. **Estudo teórico e experimental das ações em silos horizontais**. 2000. 205p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2000.

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

HERSZKOWICZ, N. **Mercado de café no Brasil**. 2015.

INNOCENTINI, M. Política brasileira do agronegócio do café: desafios e propostas. **Revista de política agrícola. Brasília**, v. 24, n. 2, p. 5-16, 2015.

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

JANSSEN, H. A. **Versuche über Getriededruck in Silozellen.** Z. Verein Deutcher Ingenieure v. 39, p. 1045-1049.1895.

JENIKE, A. W. **Storage and flow of solids.** Bulletin.of the University of Utah. Salt Lake City, Utah, Estados Unidos, 197p., 1964.

JENIKE, A. W.; JOHANSON, J. R.. **Flowfactor tester and consolidating Bench Operating Instructions.** Jenike e Johanson Inc. North Billerica, Massachusetts, USA. 40p., 1979.

JENIKE, A. W. **Storage and flow of solids.** Bulletin.of the University of Utah. n.123, Utah, 197p. 1980.

LABUZA, T.P., K. ACOTT, S.R. TATINI, R.Y. LEE. Water activity determination: A collaborative study of different methods. **Journal of Food Science**, v. 41, n. 4, p. 910-917, 1976.

LEE, Y. J., YOON, W. B. Flow behavior and hopper design for black soybean powders by particle size. **Journal of Food Engineering**. v. 144, p. 10-19, 2015.

LOPES NETO, J. P.; DA SILVA, V. R.;NASCIMENTO, J. W. B. do; Propriedades de fluxo de produtos pulverulentos alimentícios. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 639-644, 2009a.

LOPES NETO, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B do; SILVA, V. R. da. Efeito do tempo de armazenagem de rações avícolas no dimensionamento de silos. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 4, 518-527,2009b.

LOPES NETO, J. P.; MEIRA, A. S.; DO NASCIMENTO, J. WB. Flow properties and pattern flow prediction of food industrial powders. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 4, p. 627-636, 2017.

LOPES NETO, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B. do; Características de fluxo e projeto de tremonhas cônicas em silos verticais. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 17, n. 3, p. 339-345, 2013.

MILANI, A. P. **Determinação das propriedades de produtos armazenados para o projeto de pressões e fluxo em silos**. 1993, 272p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 1993.

MWITHIGA, G.; JINDAL, V. K. Physical changes during coffee roasting in rotatory conduction-type heating units. **Journal of Food Process Engineering**, Malden, v. 26, n. 6, p. 543-558, 2003.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO DO BRASIL. **Instrução Normativa nº 08 de 11 de junho de 2003**. Disponível em <[http://www.abic.com.br/publique/media/CONS leg instnormativa08-03.pdf](http://www.abic.com.br/publique/media/CONS_leg_instnormativa08-03.pdf)> Acesso em 03/11/2015.

OLIVEIRA, G. H. D.. **Propriedades físicas e termodinâmicas da sorção do café torrado, inteiro e moído durante o armazenamento.** 2013, 178 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2013.

OLIVEIRA, G. D., CORRÊA, P. C., SANTOS, F. L., VASCONCELOS, W. L., CALIL JÚNIOR, C., BAPTESTINI, F. M., & VARGAS-ELÍAS, G. A. Caracterização física de café após torrefação e moagem. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 4, p. 1813-1828, 2014.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE CAFÉ (OIC). Total production by all exporting countries. Disponível em: <http://www.ico.org/trade_statistics.asp>. Acesso: 02 de julho de 2018.

PIMENTA, T. V.; PEREIRA, R. G. F. A.; CORRÊA, J. L. G.; SILVA, J. R. Roasting processing of dry coffee cherry: influence of grain shape and temperature on physical, chemical and sensorial grain properties. **Boletim do CEPPA**, Campinas, v. 27, n. 1, p.97-106. 2009.

PITTIA, P.; DALLA ROSA, M.; LERICI, C.R. Textural changes of coffee beans as affected by roasting conditions. **LWT - Food Science and Technology**, Filadélfia, v. 34, n. 3, p. 168-175, 2001.

SANERTEL. **Seladora de cápsula de café**, 2018. Disponível em < <http://www.sanertel.com.br>>. Acesso em 12 de julho de 2018.

SCHWEDES, J. Measurement of flow properties of bulk solids. **Powder Technology**, v. 88, n. 3, p. 285-290. 1996

SCHWEDES, J. Review on testers for measuring flow properties of bulk solids. **Granular matter**, v. 5, n. 1, p. 1-43, 2003.

SCOTT, W. J. Water relation of food spoilage microorganisms. **Advances in food research**, v. 7, p. 83-127, 1957.

SHULZE, D.. Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow. **Springer**, Heidelberg., p. 35-74, 2008

SILVA, F. D., PORTO, A. G., PASCUALI, L. C., SILVA, F. D.. Viabilidade do armazenamento de sementes em diferentes embalagens para pequenas propriedades rurais. **Revista de Ciências Agroambientais**, Alta Floresta, v. 8, n. 1, p. 45-56, 2010.

SILVA, M. C. **Estudo da variabilidade de pressões em silos**. 1993, 192p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

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

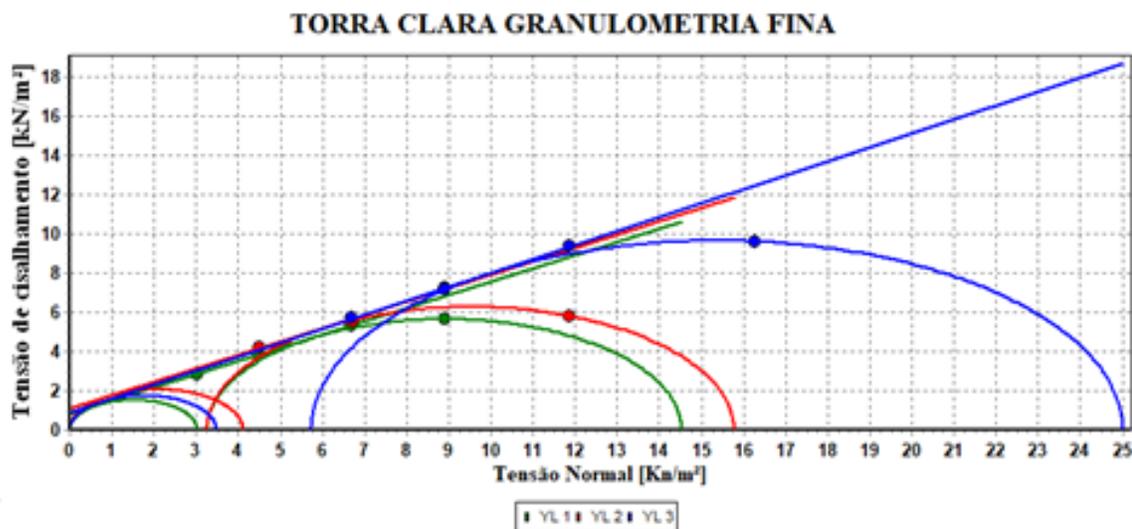
SILVA, P. A.; CUNHA, R. L.; LOPES, A. S.; PENA, R. S. Caracterização de farinhas de tapioca produzidas no estado do Pará. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 1, p.185-191. 2013.

SLETTENGREN, K.; XANTHAKIS, E.; AHRNÉ, L.; WINDHAB, E. J. Flow Properties of Spices Measured with Powder Flow Tester and Ring Shear Tester-XS, **International Journal of Food Properties**, v.19, n.7, p. 1475-1482, 2016.

TECMES. **200/400/600 Capsule al minuto**, 2018. Disponível em: < <http://www.tecmes-italia.com/it/macchine-riempimento-capsule/200-400-600-capsule-al-minuto.html>>. Acesso em 12 de julho de 2018.

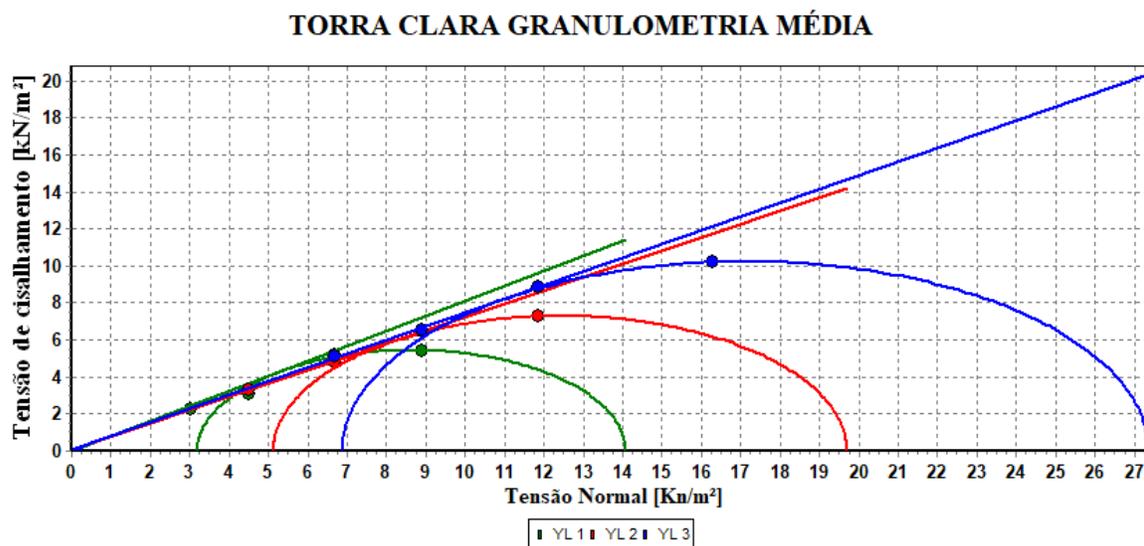
APÊNDICE A – Gráficos dos Círculos de Mohr obtidos com o aparelho “Jenike Shear Cell”

Figura 35 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Jenike Shear Cell” para a torra clara granulometria fina.



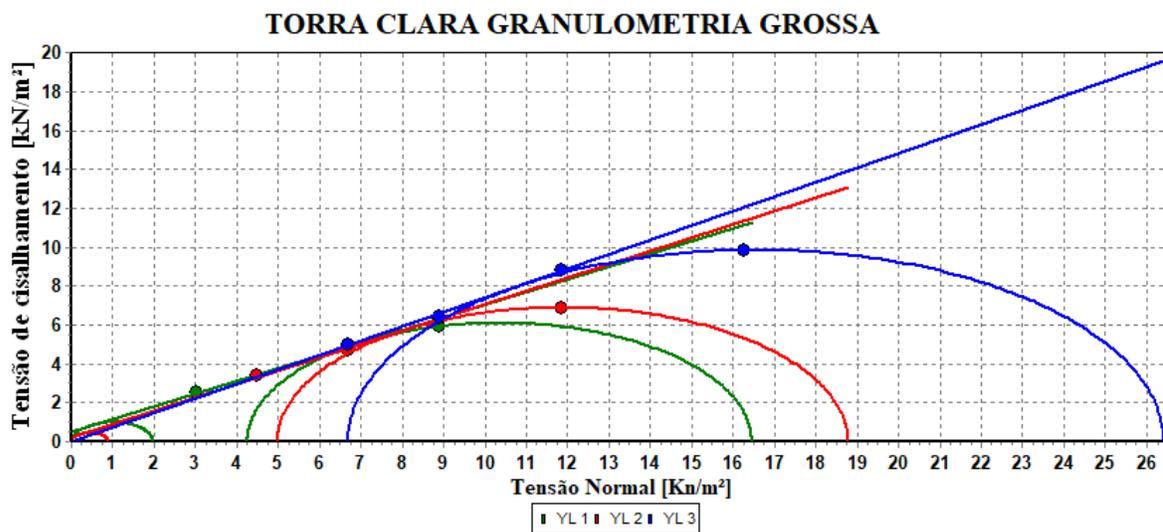
Fonte: Software Propriedades dos Produto

Figura 36 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Jenike Shear Cell” para a torra clara granulometria média.



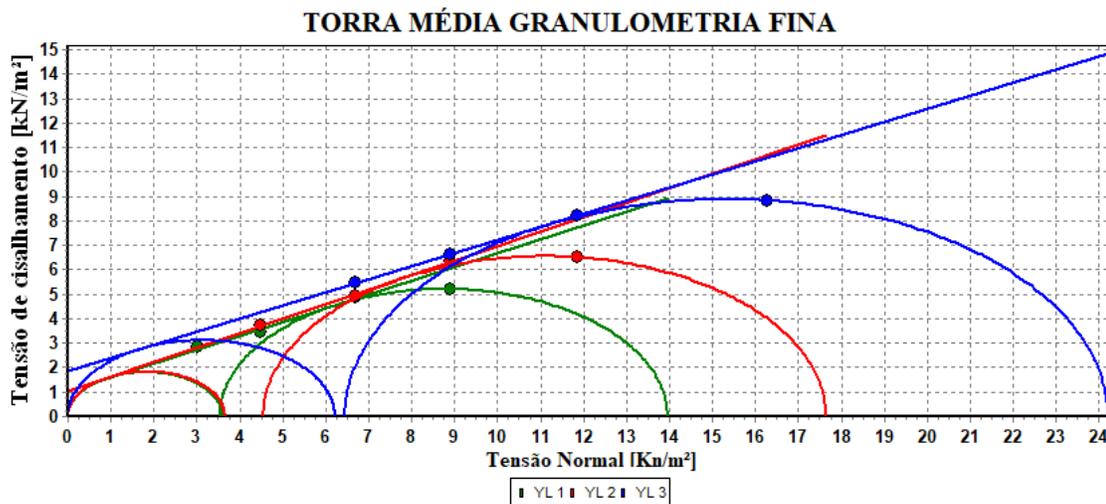
Fonte: Software Propriedades dos Produtos

Figura 37 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Jenike Shear Cell” para a torra clara granulometria grossa.



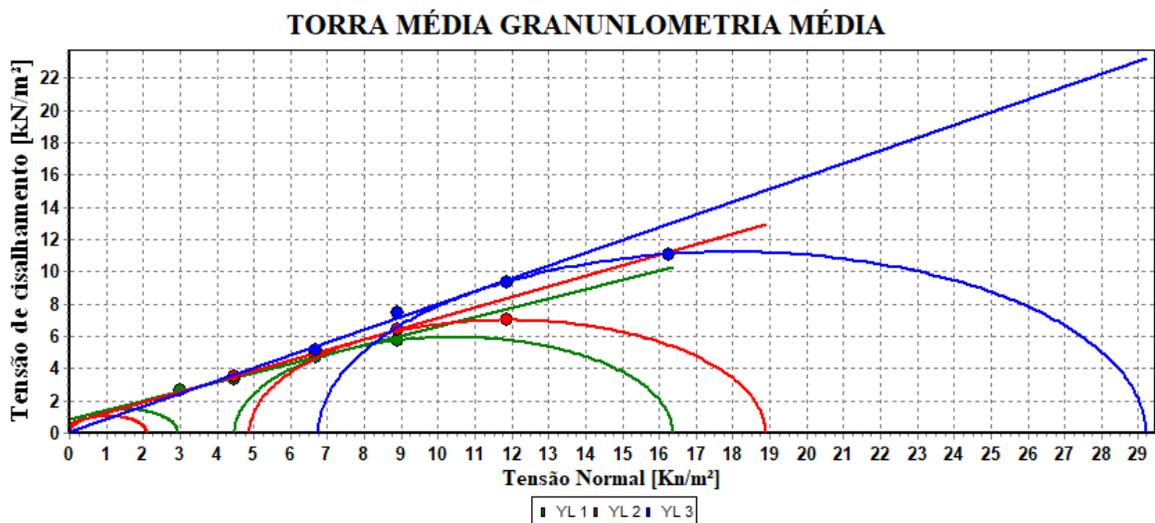
Fonte: Software Propriedades dos Produtos

Figura 38 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Jenike Shear Cell” para a torra média granulometria fina.



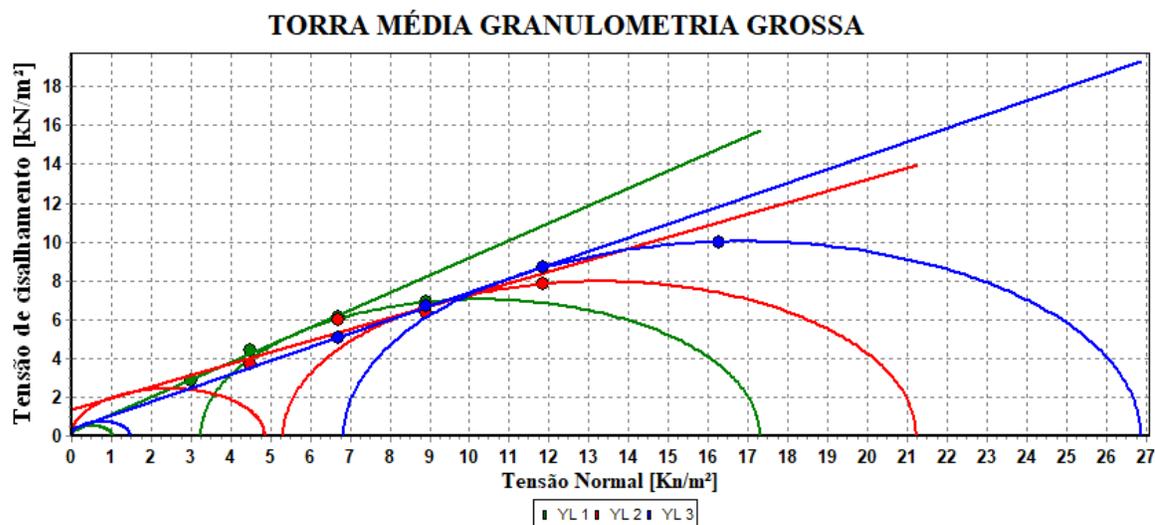
Fonte: Software Propriedades dos Produtos

Figura 39 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Jenike Shear Cell” para a torra média granulometria média.



Fonte: Software Propriedades dos Produtos

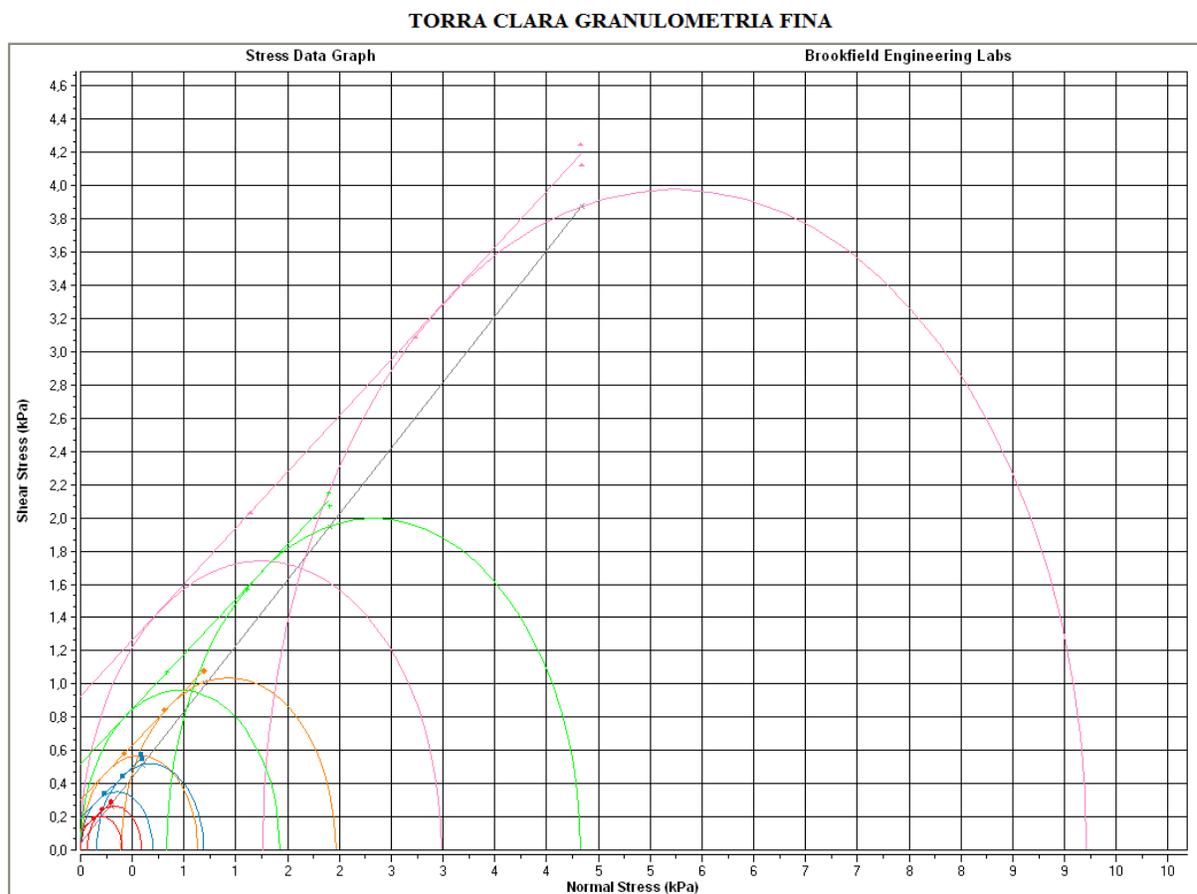
Figura 40 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Jenike Shear Cell” para a torra média granulometria grossa.



Fonte: Software Propriedades dos Produtos

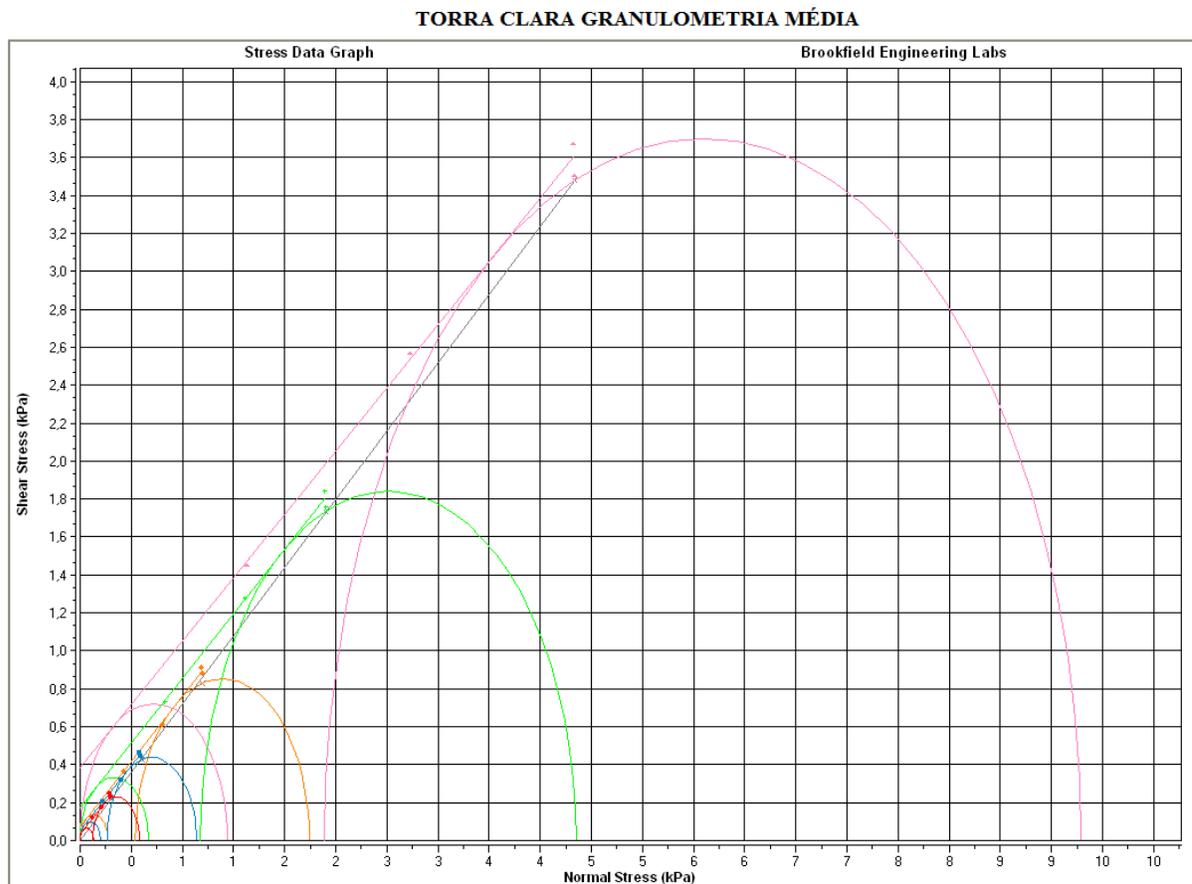
APÊNDICE B – Gráficos dos Círculos de Mohr obtidos com o aparelho “Powder Flow Tester”

Figura 41 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Powder Flow Tester” para a torra clara granulometria fina.



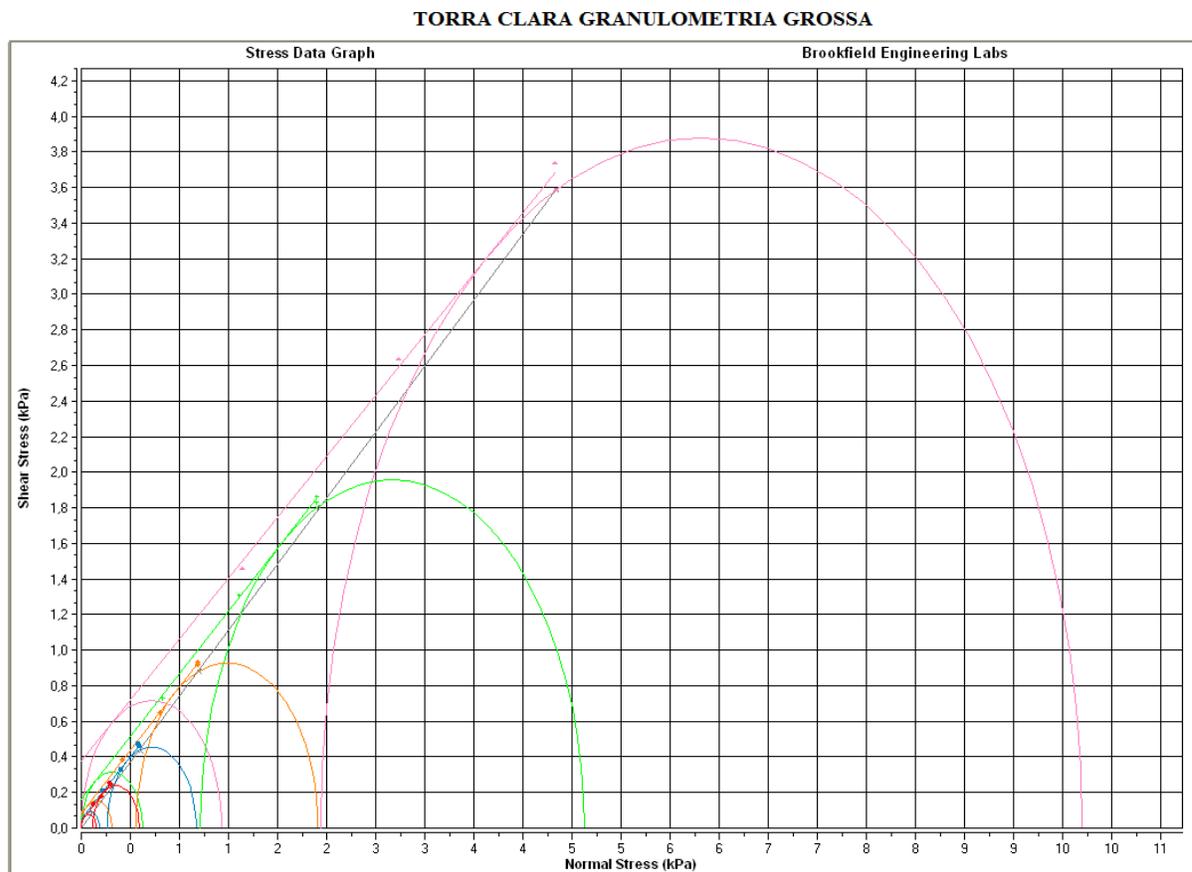
Fonte: *Software* do “Powder Flow Tester”

Figura 42 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Powder Flow Tester” para a torra clara granulometria média.



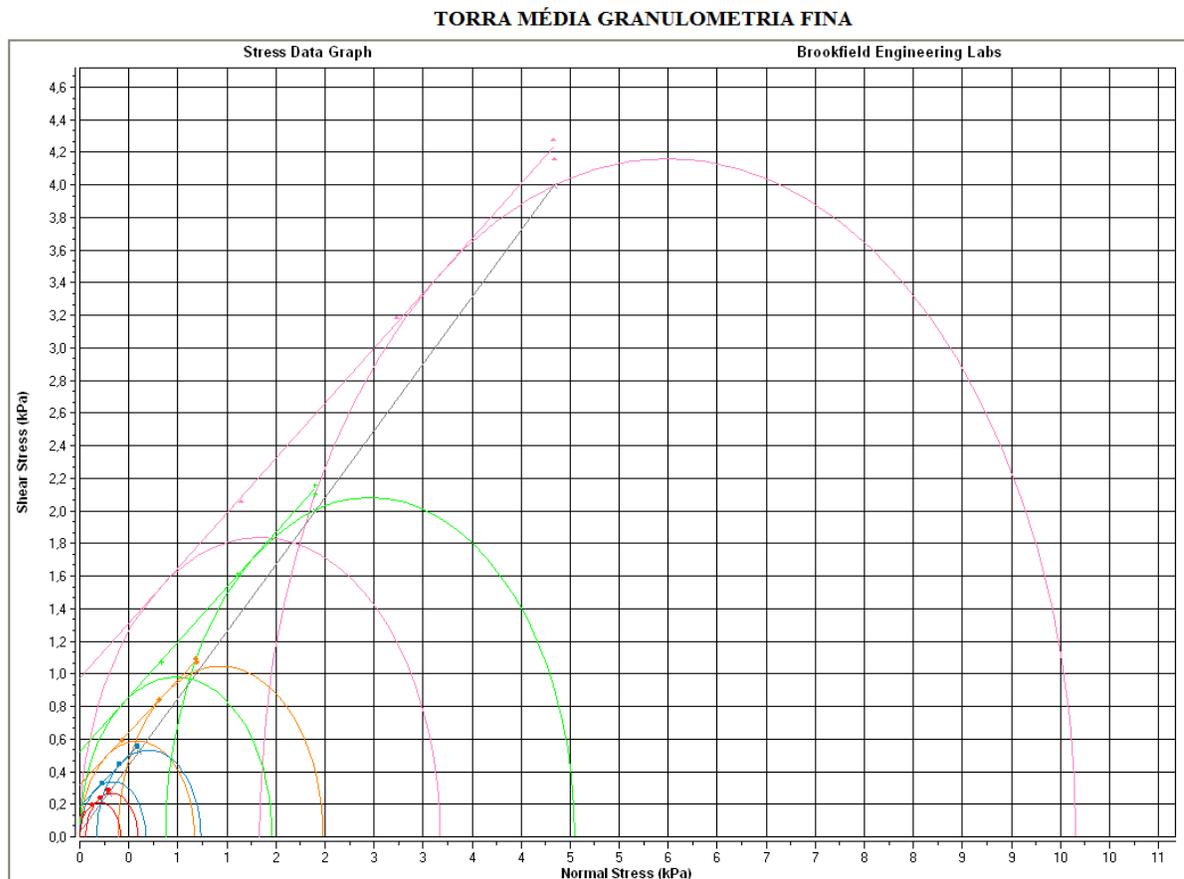
Fonte: *Software* do “Powder Flow Tester”

Figura 43 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Powder Flow Tester” para a torra clara granulometria grossa.



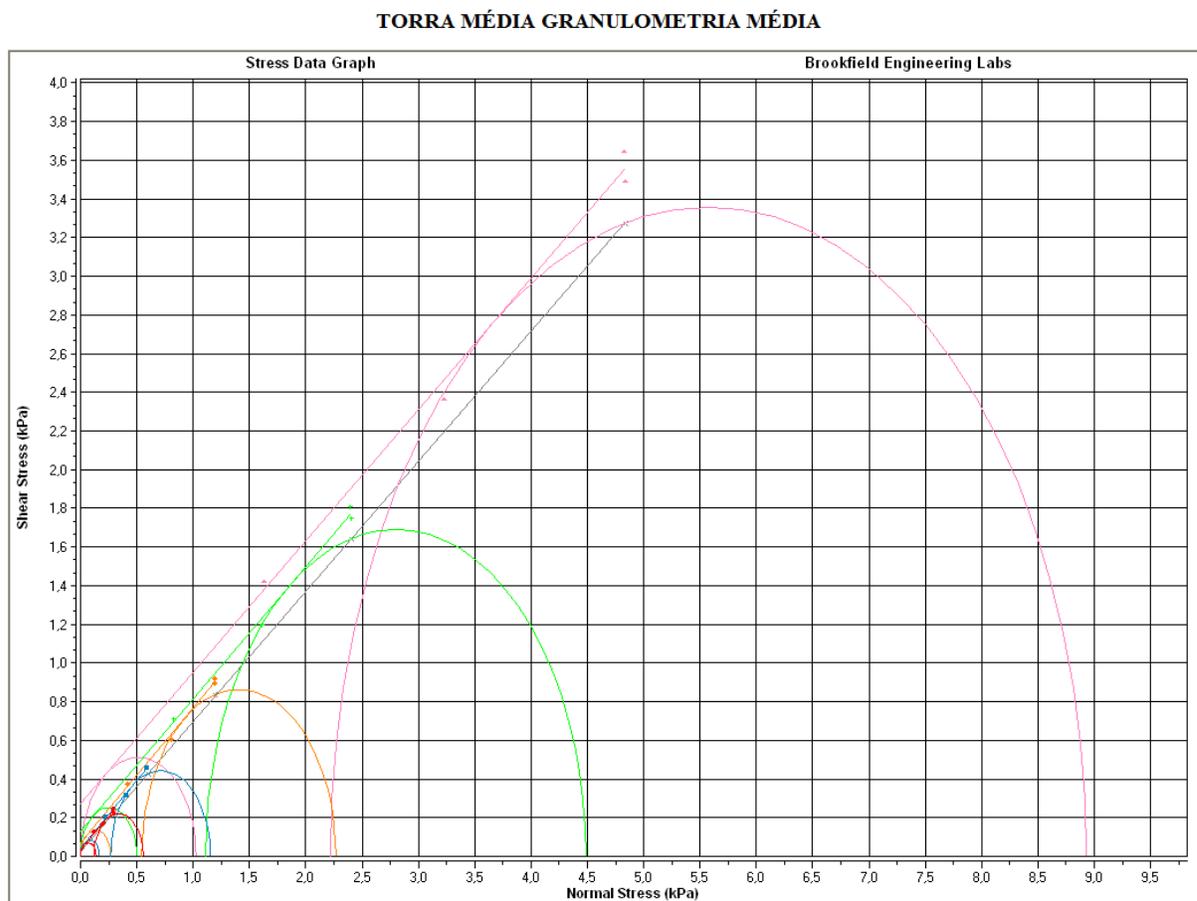
Fonte: *Software* do “Powder Flow Tester”

Figura 44 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Powder Flow Tester” para a torra média granulometria fina.



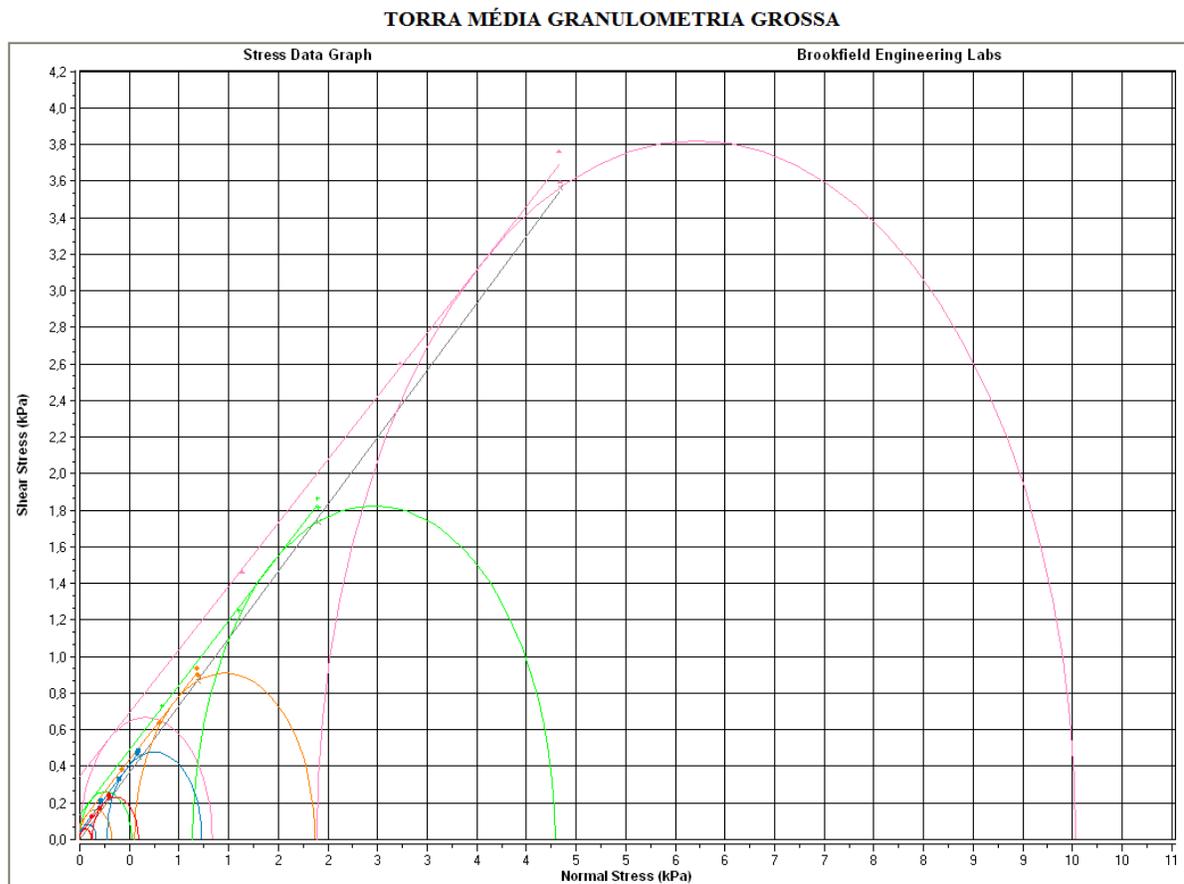
Fonte: *Software* do “Powder Flow Tester”

Figura 45 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Powder Flow Tester” para a torra média granulometria média.



Fonte: *Software* do “Powder Flow Tester”

Figura 46 - Gráfico dos Círculos de Mohr obtidos com os dados do aparelho “Powder Flow Tester” para a torra média granulometria grossa.



Fonte: *Software* do “Powder Flow Tester”