

FABRÍCIO SCHWANZ DA SILVA

**PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GRÃOS DE CAFÉ COMO SUBSÍDIO  
EM PROJETOS DE EQUIPAMENTOS E DE SILOS UTILIZANDO  
A METODOLOGIA DE JENIKE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do Título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2003

*Aos meus pais,  
Ari Oscar e Éclair, e ao irmão, Márcio,  
por todo o amor, pelo carinho, pela amizade, pelo incentivo,  
e pela oportunidade para a realização de mais um sonho.*

DEDICO.

*À minha querida esposa, Márcia,  
pelo amor, pelo carinho, pela compreensão, pelo estímulo  
e pela amizade em todos os momentos desta caminhada.*

OFEREÇO.

## AGRADECIMENTO

Ao professor Paulo Cesar Corrêa, pela orientação e participação na execução deste trabalho e, ainda, pelos valiosos ensinamentos.

Aos professores conselheiros Carlito Calil Júnior e Francisco Carlos Gomes, pela amizade, pelos ensinamentos, pelo apoio constante e pelas sugestões.

Ao professor Evandro de Castro Melo e ao pesquisador da EMBRAPA Dr. Paulo César Afonso Júnior, pelas contribuições e sugestões.

Ao professor Tetuo Hara, pela amizade, pelo incentivo e pelos valiosos ensinamentos.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, pela amizade e colaboração para realização deste trabalho.

Aos colegas da pós-graduação, pelo companheirismo e pela amizade, pelas idéias e pelo incentivo.

Aos estudantes de iniciação científica, Bruno e Rodrigo, que sempre se prontificaram a me ajudar na realização das diversas análises envolvidas, e àqueles que, porventura não tenham sido citados, mas, que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização deste trabalho.

Aos inicialmente colegas de curso e hoje amigos André e Paulo Júnior, pela amizade, pelo incentivo e pelas palavras de apoio em todos os momentos.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao FINEP/RECOPE, pelo apoio financeiro.

## **BIOGRAFIA**

FABRÍCIO SCHWANZ DA SILVA, filho de Ari Oscar da Silva e Eclair Schwanz da Silva, nasceu no município de Passo Fundo, Estado do Rio Grande do Sul, em 23 de setembro de 1973.

Em março de 1992, iniciou o Curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Pelotas, graduando-se em fevereiro de 1997.

Em abril de 1998, iniciou o Curso de Mestrado em Ciência e Tecnologia de Sementes na Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas, defendendo tese em março de 2000.

Em agosto de 2000, iniciou o Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, na área de Pré-Processamento e Armazenagem de Produtos Agrícolas, submetendo-se à defesa de tese em outubro de 2003.

## CONTEÚDO

	<b>Página</b>
RESUMO .....	vii
ABSTRACT.....	ix
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Principais espécies e estados produtores de café .....	1
1.2. Qualidade .....	2
1.3. Armazenamento .....	3
1.4. Projeto e dimensionamento de silos.....	6
1.4.1. Pressões de produtos armazenados .....	7
1.4.1.1. Coeficiente K.....	9
1.4.2. Fluxo dos silos.....	10
1.5. Determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados.....	13
1.6. Equipamento de cisalhamento de Jenike.....	16
1.7. Atrito interno, externo e plano de cisalhamento .....	18
1.7.1. Equipamentos alternativos para determinação do atrito .....	20
1.8. Propriedades físicas dos produtos armazenados .....	24
2. OBJETIVOS.....	28
2.1. Objetivo geral.....	28
2.2. Objetivos específicos.....	28

	<b>Página</b>
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	30
3.1. Equipamento de Cisalhamento de Jenike.....	31
3.2. Teste de Cisalhamento .....	33
3.3. Determinação das propriedades físicas do café determinadas pelo equipamento de cisalhamento de Jenike .....	39
3.3.1. Determinação do ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ) e do efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ) instantâneos.....	40
3.3.2. Determinação do lugar geométrico de tempo, do efetivo lugar geométrico de tempo e das propriedades físicas de tempo.....	42
3.3.3. Determinação do lugar geométrico com a parede e das propriedades físicas de atrito externo .....	43
3.4. Caracterização do material de parede.....	45
3.5. Determinação das propriedades físicas por intermédio do plano inclinado.....	46
3.6. Determinação das propriedades físicas por intermédio do equipamento experimental de arraste em conjugação com a máquina universal de teste .....	47
3.7. Determinação da função fluxo (FF) .....	49
3.8. Determinação do ângulo de repouso ( $\theta$ ) .....	49
3.9. Determinação da massa específica aparente ( $\rho_{ap}$ ).....	50
3.10. Análise estatística.....	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	52
4.1. Atrito externo .....	52
4.1.1. Coeficientes e ângulos de atrito estático e dinâmico .....	52
4.2. Atrito interno .....	70
4.2.1. Ângulos de repouso, atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno .....	70
4.3. Atrito interno com tempo de consolidação .....	78
4.3.1. Ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno .....	78
4.4. Massa específica aparente .....	83
4.5. Função fluxo.....	91
5. CONCLUSÕES .....	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	107
APÊNDICE .....	116

## RESUMO

SILVA, Fabrício Schwanz da, D.S., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2003. **Propriedades físicas dos grãos de café como subsídio em projetos de equipamentos e de silos utilizando a metodologia de Jenike**. Orientador: Paulo Cesar Corrêa. Conselheiros: Carlito Calil Júnior e Francisco Carlos Gomes.

Segundo alguns autores, a maneira mais eficiente de armazenar o café é a de colocá-lo a granel, em silos semi-herméticos, metálicos, de madeira, ou de concreto. Para um dimensionamento correto, seguro e econômico de silos, torna-se indispensável o conhecimento das propriedades físicas e de fluxo dos produtos, pois desempenham importante papel no comportamento de pressões e fluxos em silos. Este trabalho teve como objetivo determinar as propriedades físicas (ângulos e coeficientes de atrito estático e dinâmico com a parede, ângulo de repouso, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno e massa específica aparente) dos grãos de café e o comportamento deste produto em função do teor de umidade, do tempo de consolidação e dos diferentes materiais de parede; comparar os resultados das propriedades físicas instantâneas, determinados por equipamentos alternativos, com os do equipamento de Jenike, como também comparar os resultados de massa específica aparente, determinados por este equipamento, com os de uma balança de peso hectolítrico; e determinar a função fluxo dos grãos de café em função do teor de umidade e do tempo de consolidação. Com os resultados obtidos, pôde-se concluir, para ambas variedades de café estudadas, que os coeficientes e ângulos de atrito

estático e dinâmico aumentaram linearmente com o incremento do teor de umidade, independentemente do material de parede; não é recomendada a utilização dos equipamentos considerados alternativos para o projeto de silos; os ângulos de atrito interno, de repouso, o efetivo ângulo de atrito interno e a massa específica aparente aumentaram linearmente com o incremento do teor de umidade; os ângulos de atrito interno e efetivo aumentaram com o aumento do teor de umidade e do tempo de consolidação; não é aconselhável a utilização da massa específica aparente determinada na célula de cisalhamento de Jenike; os grãos de café passam de fluxo livre para fluxo fácil com o aumento do teor de umidade e do tempo de consolidação.

## ABSTRACT

SILVA, Fabrício Schwanz, D.S., Universidade Federal de Viçosa, October 2003.  
**Physical properties of the coffee grains as subsidy in projects of equipment and of silos using the methodology of Jenike.** Adviser: Paulo Cesar Corrêa.  
Committee Members: Carlito Calil Júnior and Francisco Carlos Gomes.

According to some authors, the most effective way to store coffee is by putting it in bulk, in semi-hermetic, metallic, wooden or concrete silos. For a proper, safer and economical project of silos, it is essential the knowledge on the physical properties and flow of products, since they play an important role in the calculation of pressures and kinds of flow. It was aimed with this work: to determine the physical properties (angles and coefficients of static and dynamic friction with the wall, the repose angle, the angle of internal friction, the effective angle of internal friction and bulk density) of the coffee grains and the behavior of this product in relation to the moisture content, to the time of consolidation and to the different materials of the wall; to compare the results of instantaneous physical properties determined by alternative equipments with the ones of the Jenike, as well as comparing the results of bulk density determined by this equipment with the ones of a hectolitr weight balance; and to determine the flow function of the coffee grains in relation to the moisture content and the time of consolidation. With the results obtained, it was possible to conclude to both the varieties studied that: the coefficients and angles of static and dynamic friction increase linearly with the increase of the moisture content, independently of the wall material; the use of

equipments considered alternative for the project of silos is not recommended; the angles of internal and repose friction, the effective angle of internal friction and the bulk density increase linearly with the increase of the moisture content; the angles of internal and effective friction increase with the increase of the moisture level and the time of consolidation; it is not advisable the use of bulk density determined in the Jenike shear cell; and the flow of grains goes from free flow to easy flow with the increase of the moisture content and the time of consolidation.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Principais espécies e estados produtores de café

As espécies *Coffea arabica* L. (café arábica) e *Coffea canephora* (café robusta) são, segundo MATIELLO (1991) e HAEBERLIN et al. (1993), as únicas cultivadas em grande escala nas diferentes regiões produtoras de café do mundo, representando, praticamente, 100% de todo o café comercializado mundialmente. Os grãos de café arábica apresentam melhor qualidade, produzindo uma bebida de maior valor, pois possuem aroma intenso e inúmeros sabores com variações de corpo e acidez; apresentam teor de cafeína em torno de 1,2% e podem ter diversas tonalidades de cor verde. Por esta razão, é considerado um café de melhor qualidade, mais fino e requintado, sendo, predominantemente, oferecido nas mais refinadas cafeterias do mundo. Este café alcança preços superiores aos dos grãos de café robusta, cuja bebida é considerada neutra, sendo muito usada em misturas e na indústria de solúvel. Os grãos de café robusta têm teor de cafeína superior em relação ao café arábica, isto é, cerca de 2,2%, não possuem sabores variados nem refinados, sua acidez é mais baixa e, por terem mais sólidos solúveis, são bastante utilizados na produção dos cafés solúveis, sendo reconhecidos por proporcionarem um “sabor típico e único”.

Segundo AGRIANUAL (2003), estima-se que o Brasil será, na safra 2002/2003, o maior produtor mundial de café de ambas as espécies, ou seja, arábica e robusta. De acordo com a CONAB (2003), em nível nacional, o estado de Minas

Gerais é o maior produtor de café arábica, com cerca de 65% de todo o café produzido desta espécie no país, enquanto o Espírito Santo destaca-se como o estado que mais produz café robusta, com aproximadamente 65% do total produzido pelo Brasil desta espécie. Na safra 2002/2003, aproximadamente 75% do total produzido foi da espécie arábica.

## 1.2. Qualidade

A valorização do café baseia-se em parâmetros qualitativos, sendo este um padrão de avaliação realizado em poucos produtos, significando que, quanto melhor a qualidade do café, maior será o preço obtido. Assim, a qualidade é determinante do preço e fator imprescindível para aceitação do café no mercado internacional. O consumo interno tem apresentado taxas contínuas de crescimento e o consumidor está cada vez mais exigente quanto à qualidade. Portanto, há uma tendência cada vez maior de redução de mercado para cafés de baixa qualidade, ou seja, o produtor brasileiro que tem a cafeicultura como objetivo principal deverá se especializar e adotar tecnologia adequada e moderna para produção de cafés de qualidade superior, visando não só o mercado externo, mas também o interno (SILVA e BERBERT, 1999), pois é da boa apresentação do café que depende, em grande parte, a sua colocação no mercado (SILVA et al., 2001).

Hoje, o produtor que oferece um produto melhor consegue vender melhor, pois a qualidade é sempre mais bem remunerada. No mínimo, o produtor consegue a preferência, pois sempre vende antecipadamente. Entretanto, em futuro próximo, a qualidade será obrigação e quem não a tiver não terá mercado. Já existem nichos que compram apenas produtos de qualidade, pois atendem mercados mais exigentes. O produtor precisa descobri-los, garantindo uma fatia especial de mercado e dar maior atenção a essa importante tendência da moderna comercialização (BERTOLINI e AGUILAR, 2002).

O mercado de cafés especiais, ou seja, de alta qualidade, é uma opção para o produtor que tiver capacitado a produzir uma qualidade superior e diferenciada, visto ser o café um produto agrícola *sui generis*, pois é o único que tem diversos sabores, paladares, além de uma diversidade de tipos que podem gerar preços diferenciados (CAIXETA, 2001; ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO CAFÉ, 2002).

Segundo CARVALHO et al. (1997), para sobrevivência da cafeicultura brasileira, o país tem que seguir o caminho da qualidade; assim sendo, o amplo conhecimento das técnicas de produção de café de alta qualidade é indispensável para a cafeicultura moderna.

A qualidade do produto é fator preponderante para o êxito no processo produtivo. No caso do café, os procedimentos adequados de colheita, bem como de pós-colheita, como o preparo, a secagem e o armazenamento, são determinantes para a manutenção da qualidade (OCTAVIANI, 2000).

A melhoria da qualidade do café pode ser obtida aumentando-se a eficiência do uso dos insumos, da mão-de-obra, dos tratos culturais, dos sistemas de transporte e separação, bem como escolhendo-se adequadamente as técnicas de secagem, armazenamento e preparo dos frutos e grãos (AFONSO JÚNIOR, 2001).

É conhecido que as características físicas, químicas e a qualidade dos grãos de café são influenciadas por diversos fatores que atuam nas fases pré e pós-colheita. Na etapa pré-colheita, os principais fatores que influenciam na composição e na qualidade do café são: espécie e variedade do produto, local de cultivo, maturação dos frutos, incidência de microrganismos e os níveis de adubações. Entre os fatores pós-colheita, são citados como mais relevantes as fermentações enzimáticas e microbianas, o preparo do café, a secagem, as misturas de cafés, o armazenamento, a moagem e a torração do produto (CARVALHO et al., 1997; CHALFOUN e CARVALHO, 1997).

Na produção de cafés de alta qualidade, além das técnicas adequadas de condução das lavouras, deve-se destacar a importância dos cuidados nas etapas após a colheita do produto, pois diversos fatores, principalmente os que atuam nesta fase, têm-se demonstrados como causadores de modificações indesejáveis e prejudiciais à qualidade do produto. Por outro lado, algumas técnicas utilizadas nas etapas de preparo e processamento do produto têm-se mostrado eficientes na melhoria e manutenção desta qualidade.

### **1.3. Armazenamento**

Embora a qualidade não possa ser melhorada durante o armazenamento, boas condições de armazenagem contribuirão para a conservação das qualidades iniciais do produto por um tempo prolongado, retardando, assim, o processo de deterioração

(AFONSO JÚNIOR, 2001; SILVA et al., 2001). O armazenamento do café é de fundamental importância para a qualidade final do produto, visto ser esta a etapa que antecede a comercialização e que se torna cada vez mais necessária em virtude do mercado cafeeiro (VIEIRA, 2001).

Conservar um produto após a colheita é um exercício de lógica e racionalidade, muito mais do que uma prática de rotina. Só o entendimento das interações entre o produto e o ambiente de estocagem e dos fatores que interferem nesse complexo ecossistema irá possibilitar a tomada de decisões realmente conscientes visando o armazenamento seguro. A estrutura de armazenagem é a parte do ecossistema em contato com o ambiente e tem a finalidade de proteger os grãos de efeitos negativos, com o propósito de prolongar tanto quanto possível o período de estocagem do produto. A estrutura de armazenamento deve possuir um projeto adequado para favorecer a manutenção da qualidade do produto, bem como evitar perdas (ATHIÉ et al., 1998).

Considerando-se a importância das estruturas de armazenamento para a qualidade final do café, assim como a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias e de soluções dos problemas existentes, ressalta-se a importância de estudos sobre as possíveis alternativas para o armazenamento deste produto, destacando-se, dentre elas, a utilização de silos, ou seja, o armazenamento a granel.

No Brasil, o sistema de armazenagem convencional, isto é, em sacos, ainda é amplamente utilizado para o café. Contudo, há uma necessidade crescente de se encontrar um sistema alternativo de armazenagem mais eficiente, mais prático e de menor custo, onde a alternativa mais adequada consiste no manuseio a granel do café desde a fazenda até o preparo e a comercialização (VIEIRA, 2001), concordando com DEL GIÚDICE et al. (1969), os quais afirmaram que a maneira mais eficiente de armazenar o café é a de colocá-lo a granel, em silos semi-herméticos, metálicos, de madeira, ou de concreto, elevados do solo. De modo geral, tem-se preferido silos de pequena capacidade, por acreditar-se que há maior facilidade no controle da qualidade do produto.

Embora o sistema de armazenamento convencional ofereça algumas vantagens, como: menor investimento inicial e individualização de produtos dentro de um mesmo lote, o sistema a granel ainda é mais vantajoso, pois proporciona melhores condições de conservação ao café, além de evitar o excesso de mão-de-obra (onerosa e escassa) durante o manuseio. Outro fator importante no manuseio a granel

é a economia no transporte, pela facilidade de se transportar maior quantidade do produto a granel em volume igual àquele ocupado pelo café ensacado.

A estocagem a granel do café também proporciona economia nos gastos para os produtores em virtude da não-aquisição de sacos de juta para comercializar e armazenar o produto que, com o sistema atualmente adotado, tornam-se indispensáveis.

Além das modificações necessárias nos sistemas convencionais de armazenamento, para estocagem do café a granel por longos períodos exige-se, também, um bom sistema de aeração, que deve ser dotado de termometria para que seja possível monitorar e manter a massa de grãos em temperatura e umidade ideais para conservação e comercialização.

A principal vantagem da armazenagem a granel é permitir a mecanização com substancial redução na mão-de-obra requerida, em comparação ao método tradicional de armazenagem.

Com a granelização do café, outra operação de pós-colheita que pode ser realizada juntamente com o armazenamento é a secagem, a qual pode ser realizada nos silos, das seguintes formas: seca-aeração, secagem parcelada, secagem à baixa temperatura e secagem combinada, sendo esta outra vantagem também apresentada pelo sistema de armazenagem a granel que atualmente começa a ser utilizada (SILVA et al., 2001).

O armazenamento a granel tem menor custo operacional e apresenta melhor relação entre área disponível e volume armazenado, resultando em melhor desempenho econômico. Entretanto, exige maior conhecimento técnico para execução e acompanhamento das operações, bem como maior investimento inicial, sendo que, alguns autores afirmam que com este método torna-se mais difícil a segregação de lotes e a realização de inventários precisos.

Inúmeros trabalhos, ao longo dos anos, comprovaram que o armazenamento do café a granel é viável, tanto técnica como economicamente e superior ao tradicional, em armazéns, onde o produto é estocado em sacos de juta. Com o objetivo de preservar as características originais do produto durante o armazenamento, o café deve ser estocado em coco ou com pergaminho em detrimento do beneficiado, em virtude da casca, do pergaminho e das películas do café funcionarem como proteção contra variações ambientais, tornando-o menos sujeito à deterioração e, conseqüentemente, aumentando o período de conservação,

sendo recomendado o beneficiamento do café na medida em que o mesmo for sendo comercializado (JORDÃO et al., 1974; NOGUEIRA et al., 1981; TEIXEIRA et al., 1983; MATIELLO, 1991; CHALFOUN e CARVALHO, 1997; GODINHO et al., 2000; THOMAZIELLO et al., 2000; VIEIRA, 2001).

Para verificar o nível de estruturação das propriedades da região do sul de Minas Gerais, bem como a adoção de procedimentos visando à preservação da qualidade final do produto e sua influência nos padrões de bebida produzida, SOUZA e CARVALHO (1998) aplicaram um questionário a diversos produtores, cujas respostas foram avaliadas por professores, pesquisadores e extensionistas. Os autores concluíram que as localidades estudadas apresentaram pontuações elevadas quanto às estruturas e aos procedimentos voltados para preservação da qualidade do café, tendo, em geral, as notas ou pontuações mais elevadas correspondido aos melhores padrões de bebida, ou seja, resultando em qualidade os investimentos feitos em equipamentos e estruturas na propriedade.

#### **1.4. Projeto e dimensionamento de silos**

O Brasil, como outros países do mundo, apresenta problemas com o armazenamento de produtos agrícolas e outros. Ocorrem grandes perdas pela ineficiência da capacidade de armazenagem ou pela utilização de técnicas inadequadas de armazenamento. A necessidade de aumentar a capacidade de armazenagem e de atender às solicitações de novas construções demonstra a importância do estudo da problemática de silos para o desenvolvimento de novas tecnologias e soluções dos problemas existentes (MILANI, 1993).

Considerando-se a importância das estruturas de armazenamento para a qualidade final do café, ressalta-se a importância de estudos sobre as possíveis alternativas para o armazenamento deste produto, destacando-se, dentre elas, a utilização de silos, para o armazenamento. Ao manusear os produtos armazenados a granel, em silos com descarga por gravidade, por exemplo, é fundamental que os movimentos de entrada e saída desses produtos ocorram de forma efetiva e eficiente. Assim, no caso do armazenamento granelizado, a principal meta em um projeto de silos de descarga por gravidade consiste em garantir o fluxo ininterrupto do produto armazenado, mantendo-se também a integridade da estrutura do silo, sendo, para isto,

necessário conhecer as propriedades físicas e de fluxo dos produtos armazenados (CALIL JÚNIOR, 1990; MILANI, 1993).

#### **1.4.1. Pressões de produtos armazenados**

Os primeiros silos verticais foram construídos admitindo-se a hipótese de que os produtos armazenados comportavam-se como líquidos, com a aplicação da teoria hidrostática para cálculo das pressões. Objeto de estudos desde o século XIX, as pressões exercidas por um sólido nas paredes de um silo começaram a ser pesquisadas por Baker, em 1881. Em 1892, Roberts, na Inglaterra, realizou os primeiros testes para determinar pressões laterais e verticais em silos, considerando que parte do peso do produto armazenado é transferido por atrito para as paredes dos silos. Em 1895, Janssen confirmou as hipóteses de Roberts, vindo a fornecer uma das mais importantes contribuições para o desenvolvimento da teoria sobre pressões em silos. O modelo de Janssen é até hoje utilizado, tendo sido adotado como base de cálculo das pressões de carregamento em diversas normas (GOMES, 2001).

Após estudos comparativos das principais normas internacionais de silos existentes, CALIL JÚNIOR (1990) constatou que existem muitas diferenças entre elas e que um dos poucos pontos em comum é a utilização da equação de Janssen para o cálculo das pressões de carregamento para um particular produto a armazenar, sendo esta equação função de quatro variáveis, em que três são dependentes do produto: densidade ( $\gamma$ ), coeficiente de atrito do produto com o material da parede ( $\mu'$ ) e o coeficiente de pressão lateral ( $K$ ); e uma variável dependente da geometria do silo, que é o raio hidráulico ( $R$ ). Nota-se, portanto, a importância do conhecimento das propriedades dos produtos armazenados.

Os silos são estruturas sujeitas a uma série de ciclos de carregamento-armazenamento-descarga, que fazem a distribuição das pressões nas paredes, dependentes do tempo e da interação de alguns fatores. De acordo com CALIL JÚNIOR (1990), a pressão nas paredes é função de três conjuntos de parâmetros: 1) propriedades físicas do produto armazenado; 2) propriedades geométricas e estruturais do silo; e 3) modo de operação.

Os dados relativos às pressões exercidas pelos grãos armazenados, tanto em condição estática quanto dinâmica, são de grande importância para o dimensionamento de silos (RAVENET, 1977).

Na maioria dos casos, os problemas que ocorrem na prática são devidos à concepção de projetos inadequados, bem como à falta de conhecimento das propriedades dos produtos armazenados, visto que estas exercem importante papel no comportamento de pressões e nos fluxos em silos (CALIL JÚNIOR, 1990).

A finalidade de uma especificação de cargas é fornecer condições para o projeto de estruturas de silos seguras e econômicas. Para que uma estrutura seja segura e econômica é importante que as cargas não sejam subestimadas nem especificadas como maiores que as estritamente necessárias. A segurança da estrutura só pode ser determinada quando se conhecem os tipos e modos possíveis de ruínas que nela possam ocorrer. As características de descarga do produto armazenado, o tipo de segregação, a formação ou não de áreas de produto sem movimento, o completo esvaziamento do silo, as distribuições de pressões nas paredes e fundações, a integridade e o custo da construção podem ser determinados, direta ou indiretamente, de acordo com o tipo de fluxo, seja este de massa ou de funil (CALIL JÚNIOR, 1990).

Para o cálculo das pressões no carregamento em silos verticais, por exemplo, tem-se aplicado e adotado, nos últimos anos, a norma alemã (DIN 1055, 1987), que utiliza a teoria de Janssen. Além desta norma, outras também adotam esta teoria, como exemplos a americana e a australiana.

- Pressões verticais:

$$p_{v(z)} = \frac{\gamma \cdot R}{\mu' \cdot K} \left( 1 - e^{-\frac{\mu' \cdot K \cdot z}{R}} \right) \quad (1)$$

- Pressões horizontais:

$$p_{h(z)} = \frac{\gamma \cdot R}{\mu'} \left( 1 - e^{-\frac{\mu' \cdot K \cdot z}{R}} \right) \quad (2)$$

- Pressões de atrito por m<sup>2</sup> de superfície de parede:

$$p_{w(z)} = \gamma \cdot R \left( 1 - e^{-\frac{\mu' \cdot K \cdot z}{R}} \right) \quad (3)$$

- Raio hidráulico:

$$R = \frac{A}{P} \quad (4)$$

em que

$P_{v(z)}$  = pressão vertical, segundo Janssen, a uma dada altura de armazenamento, kPa;

$P_{h(z)}$  = pressão horizontal, segundo Janssen, a uma dada altura de armazenamento, kPa;

$P_{w(z)}$  = pressão de atrito por  $m^2$  de superfície de parede, a uma dada altura de armazenamento, kPa;

$z$  = altura da massa de produto armazenado, m;

$\mu'$  = coeficiente de atrito entre o produto e a parede do silo, adimensional;

$\gamma$  = densidade aparente do produto,  $kg.m^{-3}$ ;

$R$  = raio hidráulico médio da seção da célula, m;

$k$  = coeficiente de pressão lateral, adimensional;

$A$  = área da seção transversal da célula,  $m^2$ ; e

$P$  = perímetro da seção da célula, m.

#### 1.4.1.1. Coeficiente K

O conhecimento das propriedades físicas dos produtos armazenados é importante para determinação do coeficiente K, que é definido como a relação entre a pressão horizontal e a vertical em qualquer ponto de uma massa granular, sendo também conhecido como coeficiente de pressão lateral. O coeficiente K é um dos parâmetros necessários para o cálculo das pressões que o produto exerce sobre as paredes e o fundo de um silo, sendo como já visto, indispensável para o cálculo das pressões e também totalmente dependente de algumas propriedades dos produtos armazenados.

A norma alemã (DIN 1055, 1987) define o valor de K pela expressão:

$$K = 1,2 (1 - \text{sen } \phi_i) \quad (5)$$

em que

$K$  = coeficiente de pressão lateral, adimensional; e

$\phi_i$  = ângulo de atrito interno do produto, grau.

A norma australiana (AS 3774, 1996) utiliza a seguinte expressão para determinação do valor de K:

$$K = \frac{1 + \operatorname{sen}^2 \phi_i - 2\sqrt{(\operatorname{sen}^2 \phi_i - \mu'^2 \cdot \cos^2 \phi_i)}}{4 \cdot \mu'^2 + \cos^2 \phi_i} \quad (6)$$

$$\mu' = \operatorname{tg} \phi_w \quad (7)$$

em que

$\mu'$  = coeficiente de atrito entre o produto e a parede do silo, adimensional; e

$\phi_w$  = ângulo de atrito entre o produto e a parede do silo, grau.

#### 1.4.2. Fluxo em silos

O fluxo do produto armazenado é um caso particular de ruptura que ocorre sem destruir a isotropia da massa. Na análise do comportamento das pressões em projetos de silos, uma das necessidades é conhecer as propriedades de fluxo do produto armazenado, ou seja, se ele é de fluxo livre ou não. Um segundo ponto é saber qual o tipo de fluxo será utilizado no projeto, se fluxo de massa ou funil, determinando as características de descarga do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de produto sem movimento e se o silo pode ser esvaziado completamente. Além disso, o tipo de fluxo também determina a distribuição de pressões nas paredes e na fundação do silo, influenciando, conseqüentemente, a integridade e o custo da construção (CALIL JÚNIOR, 1990; GOMES, 2001). A determinação do tipo de fluxo deve ser feita enquanto o silo está sendo projetado ou selecionado, ou quando são previstas mudanças em sua estrutura ou na manipulação dos produtos a serem armazenados.

O primeiro objetivo no projeto de silos é assegurar que o sólido fluirá por gravidade sem a ocorrência de obstruções do fluxo, sendo os principais tipos de obstruções: o arco coesivo (formado pelo resultado da consolidação e resistência do sólido armazenado), arco mecânico (obtido pelo entrosamento das partículas do sólido e ocorre devido principalmente às dimensões das partículas serem grandes quando comparadas com a boca de descarga) e à formação de tubo ou arco estável

(ocorre quando o sólido armazenado adquiriu, dentro do contorno da célula, resistência suficiente para suportá-lo, sendo esta resistência função do grau de consolidação). Como exemplo, tem-se: um sólido “fofo” não tem resistência, mas a adquire sob compressão. A relação entre resistência *versus* pressão de consolidação é referida como a função fluxo (GOMES, 2001).

Para uma dada pressão de consolidação, a resistência adquirida é variável de um produto para outro. Com relação à Figura 1, pode-se observar que o sólido B tem maior resistência e é menos de fluxo livre que o sólido A. Um perfeito sólido de fluxo livre não tem resistência e é apresentado pelo eixo horizontal; os sólidos de fluxo livre, como por exemplo o sólido C, não tem coesão, tendo este tipo de produto um fluxo sem interrupções.

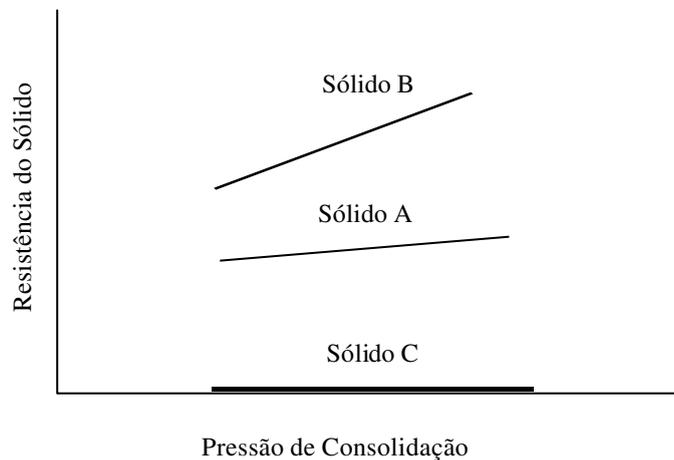


Figura 1 – Funções de fluxo em função da resistência não-confinada do sólido ( $f_c$ ) e da pressão máxima de consolidação ( $\sigma_1$ ) (Fonte: GOMES, 2001).

De acordo com JENIKE (1980), a função fluxo (FF) pode ser classificada de acordo com determinados valores-limites ou índices (Tabela 1), visto ser esta propriedade relação direta entre a pressão de consolidação e a resistência não-confinada (resistência ao deslizamento), tem-se que  $FF = \sigma_1/f_c$ .

Deve-se salientar que, para um dado sólido armazenado, tanto o seu grau de consolidação, quanto sua resistência são dependentes da umidade, do tempo de armazenamento e, em alguns casos, da temperatura do sólido.

Tabela 1 – Classificação dos materiais quanto ao tipo de fluxo, de acordo com os limites da função fluxo

Limites da FF	Classificação quanto ao fluxo
FF < 2	Muito coesivo
2 < FF < 4	Coesivo
4 < FF < 10	Fluxo ffácil
10 < FF	Fluxo livre

De acordo com várias normas internacionais, o tipo de fluxo pode ser predefinido a partir de dois gráficos, onde o ângulo ou coeficiente de atrito do produto com a parede é relacionado com o ângulo de inclinação das paredes da tremonha, que podem ser de dois tipos: plana ou cônica. A Figura 2 ilustra dois desses gráficos, apresentados pelas normas ISO 11697 (1995) e EUROCODE 1 (1993).

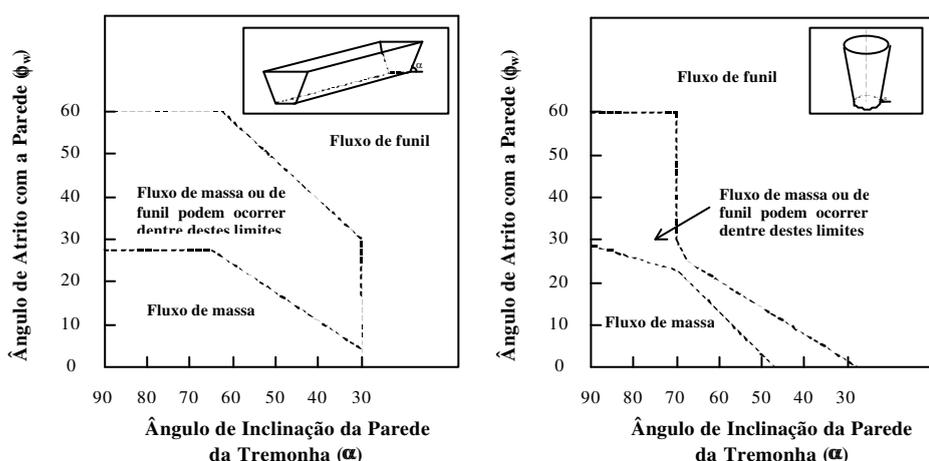


Figura 2 – Determinação do tipo de fluxo (Fonte: ISO 11697, 1995; EUROCODE 1, 1993).

Nota-se, portanto, a importância do conhecimento das propriedades físicas dos produtos armazenados, as quais exercem importante papel no comportamento de pressões e fluxos em silos. Não existe, entretanto, um consenso entre suas formas de determinação e seus valores, pois, quando estas existem, variam significativamente entre as normas existentes (CALIL JÚNIOR, 1990).

As propriedades físicas dos produtos armazenados são muito importantes para o processamento dos sistemas de armazenamento durante o carregamento e o

descarregamento. No carregamento podem ocorrer compactação e segregação; no descarregamento é possível a ocorrência de formação de abóbodas estáveis sobre a boca de descarga, o que pode acarretar sérios problemas de fluxo e estruturais na instalação, enquanto a queda posterior dessas abóbodas dá origem a pressões muito elevadas sobre as paredes dos silos e tremonhas. A formação do conduto de descarga pode provocar sérias segregações e avarias nos elementos mecânicos de descarga (REIMBERT e REIMBERT, 1976; RAVENET, 1983). No projeto de silos para fluxo por gravidade e equipamentos relacionados, uma grande quantidade de métodos, códigos e fatores devem ser considerados. É essencial que as propriedades do fluxo de produtos armazenados possam ser determinadas seguramente e alcancem as condições reais de operações esperadas.

### **1.5. Determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados**

Dentre as mais importantes propriedades físicas dos produtos armazenados, têm-se: peso específico, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito do produto com a parede e o coeficiente de atrito entre o produto e a parede da célula (GAYLORD e GAYLORD, 1984; MOHSENIN, 1986).

Um produto armazenado em um silo é solicitado por pressões que causam consolidação e fornecem resistência. As pressões mais importantes ocorrem durante o fluxo, isto é, durante a deformação contínua do produto acima de seu limite elástico. Considere-se o elemento do produto armazenado em um silo mostrado na Figura 3a,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são respectivamente a maior e a menor tensão de consolidação e são indicadas pelo semicírculo de Mohr da Figura 3b. Se o elemento para esta condição é cisalhado sob várias cargas normais, então é obtido o lugar geométrico de deslizamento (YL), Figura 3b. O semicírculo de Mohr, através da origem, define a tensão de deslizamento inconfina, que representa a resistência do material em uma superfície livre. O ângulo ( $\phi_i$ ) formado pelo lugar geométrico de deslizamento com a horizontal é o ângulo de atrito interno cinemático, já o ângulo formado pela reta que une o ponto de tangência do lugar geométrico de deslizamento com o semicírculo de Mohr de maior tensão a origem é o efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ). A tensão máxima de consolidação ( $\sigma_m$  ou  $\sigma_1$ ) é a tensão normal obtida pelo segundo círculo de Mohr, desenhado através do ponto correspondente às condições de consolidação da amostra

e tangente ao lugar geométrico de deslizamento; o maior valor da intersecção é a tensão máxima principal de consolidação. A resistência ao deslizamento ( $f_c$ ) é a tensão normal obtida pelo primeiro semicírculo de Mohr, traçado através da origem das coordenadas e tangente ao lugar geométrico de deslizamento. Portanto, a determinação das propriedades dos produtos armazenados depende do conhecimento dos lugares geométricos de deslizamento, determinados pela relação entre a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) e a tensão normal ( $\sigma$ ) para o produto armazenado, avaliando-se como desliza em relação a si próprio e com o material da parede de construção do silo (CALIL JÚNIOR, 1990; CALIL JÚNIOR et al., 1997).

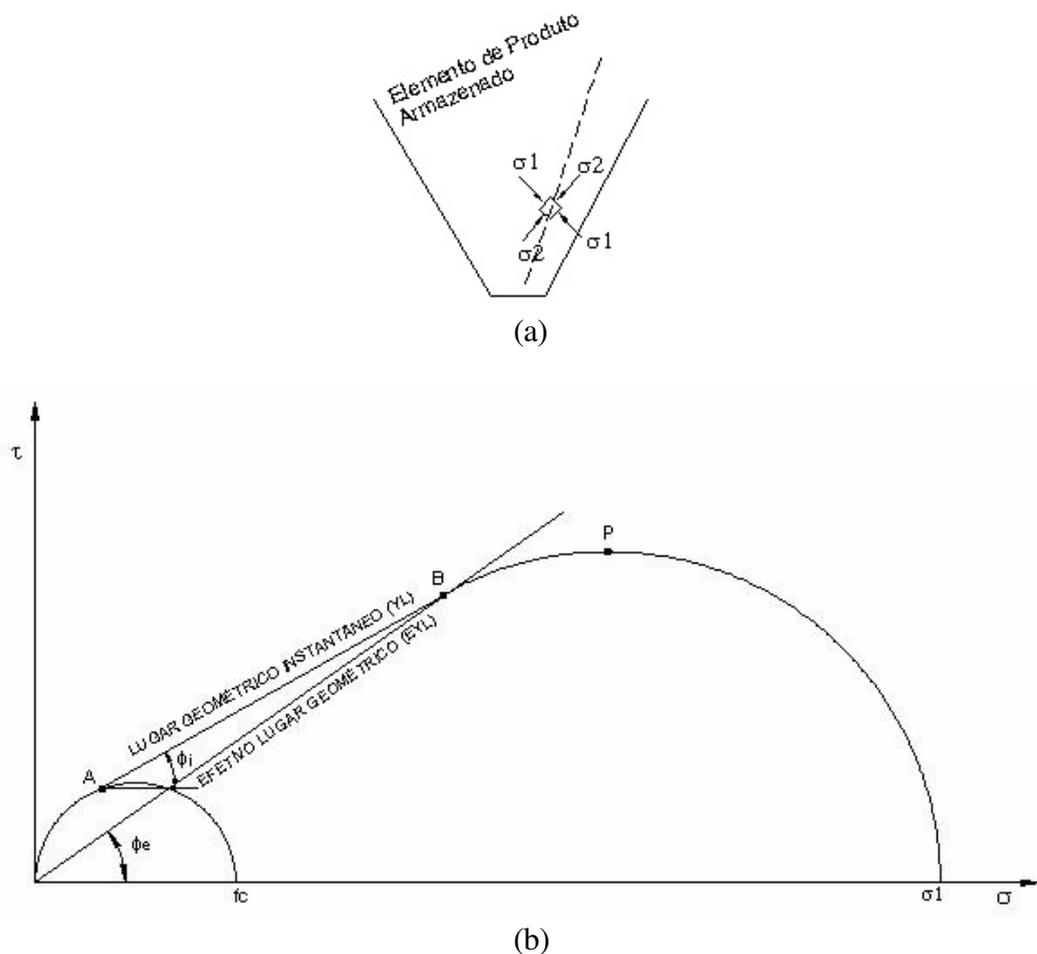


Figura 3 – Lugar geométrico de deslizamento do produto armazenado (Fonte: CALIL JÚNIOR et al., 1997).

O ângulo de repouso ( $\phi_R$ ) pode ser medido pelo amontoado de produto granular ou pulverulento formado pelo seu basculamento sobre uma superfície plana. Este somente estará em equilíbrio se os grãos menos estáveis situados na superfície

estiverem em equilíbrio estático. Desta forma, o ângulo formado pela superfície livre com o plano horizontal é o ângulo de repouso do produto, definido pelos grãos menos instáveis e não-confinados situados próximos ou na superfície. Este corresponderia, portanto, ao ângulo de atrito interno para o caso de pressões de confinamento praticamente nulas, ou ainda, ao ângulo de atrito interno do produto depositado em um estado completamente solto. De acordo com GOMES (2001), o ângulo de repouso do produto difere do ângulo de atrito interno em função das pressões impostas, referentes às condições internas da massa de grãos, dependendo do nível de pressões médias aplicadas a todos os grãos. O aumento das pressões de confinamento irá tornar a massa de grãos mais densa com menor índice de vazios, aumentando assim, o ângulo de atrito interno, sendo este normalmente maior que o ângulo de repouso.

Em testes instantâneos, o produto é conduzido a uma condição de deformação estável sob uma pressão normal predefinida em um plano de cisalhamento. Isto é conseguido em dois estágios. No primeiro estágio de preparação, os grãos são comprimidos (pressionados) por intermédio de rotações em uma célula de cisalhamento, com a finalidade de preparar uma amostra uniforme. No segundo estágio, chamado de pré-cisalhamento ou *pre-shear*, uma camada do produto através da área total da célula de cisalhamento é forçada a deformar sob pressão e tensão cisalhante até que uma força de cisalhamento estável ou quase aproximada é alcançada. Um processo de otimização é usado para determinar as pressões mais adequadas de rotações, bem como o número de rotações. Algumas vezes, uma seqüência de diminuição ou aumento das pressões de pré-cisalhamento é também necessária. Nos testes em função do tempo, um terceiro estágio de consolidação sob pressão estática é aplicado para determinar o efeito tempo, isto é, o efeito do tempo de armazenamento no produto armazenado em um tempo predefinido.

O lugar geométrico de deslizamento com a parede (WYL) é obtido na mesma célula de cisalhamento usada para determinação do YL, pela remoção da parte do fundo da célula e da instalação de um fundo formado pelo material da parede a ser testado. O ângulo de atrito com a parede ( $\phi_w$ ) é formado entre o WYL e a horizontal. A determinação destes lugares geométricos (YL e WYL), representa também o caminho para prever a forma da tremonha e as dimensões da boca de descarga que irá fornecer, onde possível, um determinado fluxo do produto armazenado e um

predeterminado tipo de fluxo. Estes parâmetros também são necessários para o cálculo das pressões nas paredes do corpo do silo e da tremonha.

Os aparelhos apropriados para medir as propriedades físicas e, ou, de fluxo são os de cisalhamento. Nesses aparelhos, que podem ser diretos ou indiretos, o produto é conduzido ao cisalhamento nele mesmo ou ao longo de uma parede em condições específicas. Nos testes de cisalhamento direto, o projeto do aparelho fixa a direção do plano de cisalhamento e são diferenciados pelos movimentos de rotação ou translação, ao passo que nos testes de cisalhamento indireto, as direções das tensões principais são fixadas e estes podem ser biaxiais ou triaxiais. Os aparelhos de cisalhamento direto com movimento de translação têm tensões de cisalhamento limitadas, pelo fato de alguns possuírem um deslocamento máximo entre 4 e 5 mm. Para estar certo de que dentro desta pequena distância os valores máximos de tensões de cisalhamento sejam obtidos, a amostra deve ser pré-consolidada. Esta pré-consolidação não é necessária nos aparelhos de cisalhamento direto com deslocamento rotacional, devido ao seu deslocamento de cisalhamento ser ilimitado.

## **1.6. Equipamento de cisalhamento de Jenike**

Com o importante desenvolvimento da mecânica dos sólidos, A.W. Jenike, em 1952, iniciou seus estudos investigando a aplicabilidade dos equipamentos de testes disponíveis da mecânica dos solos para medir as propriedades dos produtos armazenados. Visto que todos estes equipamentos foram insatisfatórios em relação à determinação destas indispensáveis propriedades, JENIKE (1964) realizou um estudo muito importante para determinação dessas propriedades, desenvolvendo uma metodologia e um aparelho de cisalhamento apropriado para produtos armazenados, ou seja, a célula de carga de Jenike ou *Jenike Shear Cell* como é conhecida internacionalmente. Este é um aparelho de cisalhamento direto com movimento de translação, o qual, desde então, tem sido usado por pesquisadores em todo o mundo e adotado e recomendado pelas principais normas internacionais (CALIL JÚNIOR, 1990; MILANI, 1993;). Com os parâmetros determinados por meio deste equipamento, é possível a determinação e a predição das pressões que ocorrerão na estrutura e, principalmente, dos tipos de fluxo, o que é muito importante no processamento e na expedição do produto armazenado a granel.

SCHWEDES (1981) realizou uma comparação direta entre aparelhos de cisalhamento através de uma seleção arbitrária dos itens para serem analisados. O estudo permitiu verificar, por meio dos resultados obtidos, que não existe nenhum aparelho universal e, dependendo de cada aplicação, eles têm vantagens e desvantagens. Neste mesmo estudo comparativo de equipamentos de cisalhamento, no item utilizável para produtos granulares grandes ( $> 10$  mm), o equipamento de Jenike apresentou algumas limitações, não sendo recomendado para materiais granulares grandes, ou seja, maiores que 10 mm, sem a realização de testes preliminares com as duas dimensões das células de cisalhamento, sendo estes testes, muito importantes, principalmente para poder propiciar de maneira segura e correta a determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados. Para cada caso deve-se realizar ensaios preliminares, a fim de avaliar o uso do equipamento para aquela situação específica.

De acordo com Calil Júnior, citado por MILANI (1993), a classificação dos produtos, em função das dimensões do diâmetro de suas partículas, é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação dos materiais quanto ao tamanho do diâmetro (D) de suas partículas

<b>Limites do Diâmetro (mm)</b>	<b>Classificação Quanto ao Tamanho</b>
$D > 0,42$	Granular
$0,42 < D < 0,149$	Pulverulento coesivo
$0,149 < D < 0,079$	Pulverulento coesivo fino
$D < 0,079$	Pulverulento coesivo extrafino

HAAKER (1990) relata em seu estudo que, da maioria dos aparelhos de cisalhamento analisados por Schwedes, um dos mais utilizados é o de Jenike, no qual as propriedades de fluxo dos produtos são medidas de acordo com um método bem descritivo, levando, em geral, a resultados seguros para projetos de silos.

Ao comparar diferentes equipamentos para medir as propriedades de fluxo do cimento, REED e ARNOLD (1987), concluíram que as determinações feitas por vários equipamentos, muitas vezes não atingem os valores necessários para permitir um escoamento seguro do produto armazenado, enquanto as realizadas pela célula de carga de Jenike apresentaram os valores mais adequados para as propriedades determinadas para este produto.

## 1.7. Atrito interno, externo e plano de cisalhamento

O conhecimento do atrito é muito importante no dimensionamento de equipamentos de transporte, processamento e armazenamento. Segundo FERREIRA (1999), atrito é a fricção entre dois corpos; é a designação comum aos fenômenos em que o movimento relativo entre duas superfícies em contato é freado pelas forças de adesão existentes entre as superfícies (força de atrito). Este atrito pode ser de escorregamento, que ocorre entre duas superfícies sólidas em contato e que deslizam uma sobre a outra; de rolamento, entre uma superfície sólida e outra superfície que rola sobre ela; e atrito interno de um fluido, ou seja, viscosidade.

Diversos autores definem o atrito como sendo qualquer força que resiste ao movimento relativo de substâncias que estão em contato mútuo. Existem dois tipos de atrito, o estático e o dinâmico ou cinemático; o dinâmico pode ser de deslizamento ou escorregamento e de rolamento. O coeficiente de atrito é a relação entre a força necessária para vencer o atrito e a força normal de uma superfície contra a outra. Algumas considerações feitas por estes autores sobre atrito: o atrito age paralelamente às superfícies em contato e na direção oposta à da força que produz ou tende a produzir o movimento; o atrito depende da natureza dos materiais em contato e de seu grau de “polimento”; o atrito cinético ou dinâmico é menor que o atrito estático; o atrito cinético é praticamente independente da velocidade; o atrito independe praticamente da área de contato; o atrito é diretamente proporcional à força de uma superfície contra outra.

De acordo com a citação de MOHSEIN (1970), as leis básicas que descrevem o fenômeno de atrito foram enunciadas primeiramente por Amontons e, posteriormente, verificadas por Coulomb, e estes declararam que a força de atrito é proporcional à carga normal; independente da área da superfície de deslizamento; completamente independente da velocidade de deslizamento; e depende da natureza dos materiais em contato. Posteriormente, Sherwood, citado por MOHSEIN (1970), resumiu os conceitos mais comuns aceitos sobre atrito. Sherwood utilizou métodos e equipamentos considerados mais “modernos” e “precisos” determinando que a força de atrito pode ser definida como a força que atua no plano que contém o ponto ou pontos de contato e pode ser tal que resista ao movimento relativo das superfícies em contato; a força de atrito pode ser considerada como sendo composta por dois componentes principais, uma força necessária para deformar e cisalhar as

“asperezas” das superfícies em contato e uma outra força necessária para superar a adesão ou coesão entre as superfícies; a força de atrito é diretamente proporcional à real área de contato; a força de atrito depende da velocidade de deslizamento das superfícies de contato, devido ao efeito da velocidade na temperatura dos materiais em contato; a força de atrito depende da natureza dos materiais em contato; e a força de atrito não depende da aspereza das superfícies, exceto para casos extremos de superfícies muito lisas (polidas) ou muito ásperas (rugosas). Como conclusão final, Sherwood declarou que, apesar das novas descobertas, as descobertas de Couloumb’s sobre atrito continuavam sendo úteis, embora estas não expliquem completamente muitos dos eventos observados, como o mecanismo de atrito e a influência de vários fatores nos coeficientes de atrito.

Conforme MOHSENIN (1986), dois coeficientes de atrito são considerados para os produtos biológicos: o de atrito estático, determinado pela força que é capaz de vencer a oposição ao movimento entre os corpos em contato; e o de atrito dinâmico, determinado pela força que se manifesta na superfície de contato quando há movimento relativo entre os corpos.

Segundo BOUMANS (1985), dois tipos de atrito podem ser distinguidos, que são: o externo, que é o atrito do produto armazenado (ex.: grão) contra o material da parede do silo ou equipamento; e o interno, que é o atrito do produto armazenado contra outro, ou seja, atrito grão contra grão. O atrito interno (ex.: grão/grão) é diferente para cada produto, sendo muito dependente do tipo e da superfície do produto, da pressão na superfície do produto (compressão) e da umidade do mesmo. Para o atrito externo, outro fator deve também ser considerado, o material da superfície que simula a parede do silo. Produtos de fluxos mais difíceis são caracterizados por possuírem coesão e um atrito interno ou externo maiores do que produtos de fluxo livre. Cabe lembrar que o atrito externo, ou seja, com a parede, possui coeficientes de atrito estático e dinâmico.

Segundo REIMBERT e REIMBERT (1976), as principais características de fluxo dos materiais armazenados são: atrito interno (grão/grão), atrito externo (grão/parede), ângulo de repouso e massa específica aparente ou densidade aparente.

Vários autores ao longo dos anos destacam que os coeficientes de atrito estático e dinâmico de grãos e outros produtos armazenados são necessários e fundamentais para o projeto racional de equipamentos de transporte, processamento e

armazenamento (MOHSENIN, 1986; SINGH e GOSWAMI, 1996; GUPTA e DAS, 1998; BARYEH, 2002).

Segundo THOMPSON et al. (1988), a equação desenvolvida por Janssen, em 1895, é a mais comumente usada até os dias de hoje para prever as pressões exercidas pelos produtos granulares nas paredes e no fundo das estruturas de armazenagem durante o carregamento. Na equação utilizam-se parâmetros que estão baseados nas propriedades físicas do produto armazenado e na geometria da estrutura de armazenagem.

A determinação correta do valor do coeficiente de atrito entre grãos e diferentes materiais de parede é necessária para um cálculo seguro das pressões nas paredes do silo. O coeficiente dinâmico de atrito é necessário para calcular a pressão dos grãos quando estes se movem em contato com as paredes do silo e da tremonha. Isto ocorre quando na descarga em silos altos e no piso de silos horizontais (GUMBE e MAINA, 1990; BUCKLIN et al., 1993).

Segundo um levantamento feito por VISWANATHAN et al. (1996), para a maioria dos produtos agrícolas, os coeficientes de atrito dependem do teor de umidade e independentemente, das superfícies dos materiais, aumentam com o aumento do teor de umidade, corroborando com MOHSENIN (1970), onde este afirma que a maioria das propriedades físicas dos grãos varia de acordo com a variação do seu teor de umidade. As superfícies menos rugosas (mais lisas) oferecem atrito menor que as mais rugosas (ásperas), ou seja, menores coeficientes de atrito.

Segundo MOHSENIN (1986), ao longo dos anos, várias pesquisas determinaram as propriedades físicas dos mais diferentes produtos incluindo os coeficientes de atrito interno e externo, estático e dinâmico. Para tais determinações foram utilizados inúmeros métodos e equipamentos sendo, em sua maioria, de baixo custo e de fácil construção e operação.

### **1.7.1. Equipamentos alternativos para determinação do atrito**

Um dos métodos mais utilizados para determinação do ângulo de atrito estático e, conseqüentemente, do coeficiente de atrito estático é o constituído de um plano inclinado móvel, chamado de método do plano inclinado (Foto 1). Sua superfície simula o material utilizado na construção das paredes dos silos ou até mesmo pode ser o próprio grão, sendo possível determinar, assim, os ângulos e

coeficientes de atrito estático interno e externo. Este método, originalmente, foi desenvolvido e utilizado para determinação do ângulo de repouso de diferentes produtos, sendo esta sua finalidade inicial. Sobre a superfície do plano móvel é colocado o produto a ser testado, que se encontra dentro de um recipiente que pode ser cilíndrico ou retangular, sem tampa e sem fundo. O recipiente é levemente suspenso da superfície, com o objetivo de evitar seu contato com a mesma durante a execução do teste. A superfície que o contém, ou seja, o plano inclinado móvel, é inclinado gradualmente até o instante em que o recipiente começa a deslizar, momento este em que o plano que contém a superfície da parede não é mais elevado e o ângulo que o mesmo forma com a horizontal é lido em uma escala graduada ou calculado através do conhecimento de algumas medidas de distância, pois o coeficiente de atrito ( $\mu'$ ) estático do produto é igual à tangente deste ângulo, ou seja, o ângulo de atrito estático do produto com o material de parede (externo) ou com o próprio grão (interno).

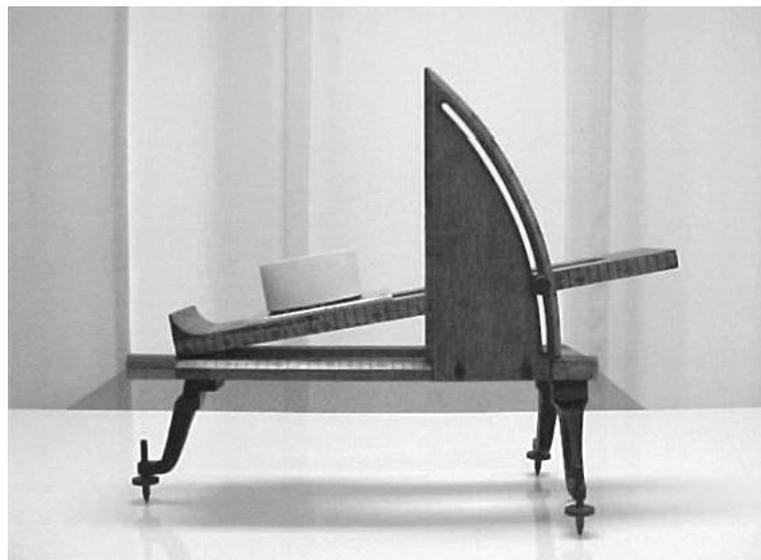


Foto 1 – Plano inclinado.

O método do plano inclinado foi utilizado para determinação das propriedades acima descritas, por inúmeros pesquisadores (ESCHENWALD e HALL, 1961; GHOSH, 1968; SHEPHERD e BHARDWAJ, 1986; DUTTA et al., 1988; OJE e UGBOR, 1991; JOSHI et al., 1993; SUTHAR e DAS, 1996; SINGH e GOSWAMI, 1996; GUPTA e DAS, 1997; JAIN e BAL, 1997; AVIARA et al., 1999; OLAJIDE e ADE-OMOWAYE, 1999; OLAOYE, 2000; BARYEH 2001; NIMKAR

e CHATTOPADHYAY, 2001; BARYEH 2002) ao longo dos anos e para os mais diversos produtos entre eles: grãos-de-bico, milho, feijão, feijão-da-china, feijão-de-corda, café, sementes de melão, abóbora, cominho, melancia, girassol, mamona entre outras. Nos testes foram utilizados os mais diferentes materiais de parede, entre eles: aço galvanizado, vidro, aço liso, ferro galvanizado, alumínio, plástico e borracha. Pôde ser observado, em praticamente todos os trabalhos realizados com produtos que apresentaram diferentes teores de umidade, que os resultados apresentaram uma relação linear direta entre o coeficiente de atrito estático e o teor de umidade dos produtos em análise, onde o aumento do teor de umidade gerou um aumento nos valores dos coeficientes de atrito, independentemente da superfície do material de parede. Outro resultado observado foi que as superfícies empregadas nos testes afetam de modo substancial os coeficientes de atrito, sendo em muitos casos, seu efeito sobre o coeficiente maior que o da umidade.

Outro método muito utilizado é o de arraste, sendo um dos primeiros equipamentos empregados o apresentado e utilizado por RICHTER (1954), equipamento este, modificado e melhorado ao longo dos anos, como, por exemplo, através das adaptações feitas por CLARK e MCFARLAND (1973), que acoplaram uma máquina universal de testes ao sistema, a fim de permitir uma determinação mais precisa da força de atrito não somente estática como também da dinâmica. Este sistema foi inicialmente utilizado no Brasil por TOSELLO (1975), o qual também propôs e fez alterações, entre elas a colocação de rolamentos no recipiente que contém o grão.

Este equipamento é utilizado para determinar o coeficiente de atrito estático, dinâmico e, conseqüentemente, seus ângulos; é composto geralmente por uma plataforma sobre a qual é colocada e fixada a superfície do material de parede a ser testada ou sobre o próprio produto, sendo os grãos colocados dentro de um recipiente onde, assim como no método anterior, pode ser cilíndrico ou retangular e deslocado, ou seja, é arrastado durante a realização do ensaio. O recipiente é levemente erguido ou suspenso para que não exista nenhum ponto de contato do mesmo com a superfície do material. Os grãos contidos dentro deste recipiente são comprimidos por intermédio de uma carga uniformemente distribuída na superfície da massa de produto (Foto 2). O coeficiente de atrito é resultado da relação entre a força de atrito e a força normal sobre a superfície de contato.

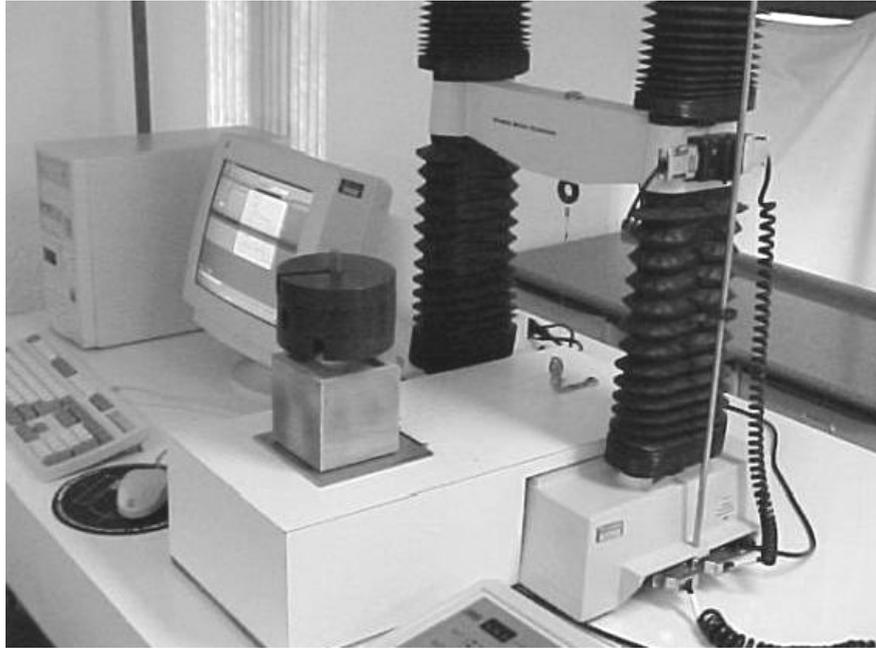


Foto 2 – Equipamento experimental de arraste.

Este equipamento e outros semelhantes foram utilizados para determinação das propriedades de atrito ao longo dos anos para os mais diversos produtos, entre eles: sementes de areca, nin, grãos de café, sorgo, trigo, milho, cevada, arroz, feijão, soja, amendoim e castanhas de caju. Basicamente, os resultados obtidos apresentaram uma tendência semelhante aos do método anterior (plano inclinado), ou seja, um aumento de ambos os coeficientes com o aumento do teor de umidade e uma maior influência do material de parede do que o teor de umidade sobre os coeficientes e ângulos de atrito estático e dinâmico, interno e externo (RICHTER, 1954; BRUBAKER e POS, 1965; BICKERT e BUELOW, 1966; SNYDER et al., 1967; STEWART et al., 1969; CLARK e McFARLAND, 1973; TOSELLO, 1975; BENEDETTI, 1987; KALEEMULLAH, 1992; JHA, 1993; VISWANATHAN et al., 1996; JHA, 1998; CHANDRASEKAR e VISWANATHAN, 1999; JHA, 1999; BALASUBRAMANIAN, 2001; IRTWANGE e IGBEKA, 2002; KALEEMULLAH e GUNASEKAR, 2002).

Segundo BOUMANS (1985), o método mais aceito e utilizado pelas principais normas internacionais de silos para determinar os coeficientes e ângulos de atrito interno e externo é o que utiliza a teoria e o equipamento desenvolvidos por Jenike, que determina o ângulo de atrito interno e o de atrito com a parede, sendo com estes determinados os coeficientes de atrito grão/grão e, principalmente, do grão/parede.

## 1.8. Propriedades físicas dos produtos armazenados

No Brasil, as propriedades físicas dos produtos armazenados estão sendo determinadas atualmente por uma máquina de cisalhamento direto com movimento de translação, modelo TSG 70-140, que foi construída com base no aparelho de cisalhamento de Jenike.

NASCIMENTO et al. (2002a) trabalharam com feijão “mulatinho” e tiveram como objetivo avaliar e determinar para dois teores de umidade (18 e 20% b.u.) as seguintes propriedades: granulometria, densidade de consolidação, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno e ângulo de atrito do feijão com seis tipos de materiais de parede de silo (aço liso, aço rugoso, alumínio, madeira, concreto e acrílico). Concluíram que as propriedades não se alteraram ou alteraram de forma muito discreta com o incremento do teor de umidade de 18 para 20%. O efeito do tempo de consolidação também não foi significativo e os ângulos de atrito do feijão com os materiais de parede foram maiores e praticamente iguais para a madeira e o concreto e menores para os demais materiais.

Trabalhando com feijão preto comercializado na região Nordeste do Brasil, NASCIMENTO et al. (2002b) tiveram como objetivo avaliar e determinar para diferentes teores de umidade (14, 20 e 25% b.u.) e tempos de consolidação (24, 48 e 72 horas) algumas propriedades: granulometria, densidade de consolidação, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno e ângulo de atrito do feijão com cinco tipos de materiais de parede de silo (aço liso, aço rugoso, alumínio, madeira e acrílico). Concluíram que as propriedades alteram-se com o teor de umidade de 20%, ou seja, com o incremento do teor de umidade de 14 para 25% aumenta o ângulo de atrito, sendo que para 20% ele apresentou resultados superiores aos de 25%. O efeito do tempo de consolidação não foi significativo e os ângulos de atrito do feijão com os materiais de parede foram maiores e praticamente iguais para a madeira e o aço rugoso e menores para os demais materiais testados, os quais também não variaram significativamente entre si.

Com o objetivo de fornecer resultados para elaboração de projetos de silos e predição do fluxo de flocos de milho, NASCIMENTO et al. (2001a) determinaram as propriedades de fluxo de dois tipos deste produto comercializado no Nordeste brasileiro. Muitas vezes ocorrem problemas nas fábricas com o escoamento de flocos de milho, tanto durante o esvaziamento de silos quanto para o abastecimento das

máquinas de empacotamento, onde, nos dois casos, pode ocorrer a parada da linha de produção em virtude da não-continuidade do fluxo, o que, conseqüentemente, traz transtorno e prejuízo para as indústrias.

NASCIMENTO et al. (2001b) trabalharam com feijão “macassar” (*Vigna unguiculata*) e tiveram como objetivo determinar para diferentes teores de umidade as seguintes propriedades de fluxo: granulometria, densidade de consolidação, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno e ângulo de atrito do feijão com seis tipos de materiais de parede de silo. A determinação destas propriedades é de fundamental importância para o projeto adequado de silos e tulhas que abastecem as máquinas empacotadoras para evitar transtornos e prejuízo financeiro devido ao não-escoamento do produto. Concluíram que com o incremento do teor de umidade aumenta o ângulo de atrito interno, bem como o ângulo de atrito com a parede para os diferentes materiais testados.

Determinar as propriedades físicas das sementes de urucum e do subproduto colorau para serem empregados na elaboração de projetos de pressões e fluxos em silos foi o objetivo de BARRÊTO (1997), que determinou tais propriedades em função do teor de umidade do produto e do tempo de consolidação, concluindo que, com o aumento do teor de umidade, houve diminuição dos ângulos de atrito interno, comportamento este também obtido para o ângulo de atrito com os diferentes materiais de parede testados.

As propriedades físicas de produtos armazenados como ração e fubá e cinco tipos de farelos foram determinadas por CALIL JÚNIOR et al. (1997) e, com tais informações, torna-se possível determinar e prever as pressões que ocorrem na estrutura do silo e os tipos de fluxo fundamentais para o processamento e expedição da ração.

Em vista da importância deste assunto, MILANI (1993) desenvolveu um trabalho com o objetivo principal de contribuir com o desenvolvimento da norma nacional específica para projeto e construção de silos, definindo uma metodologia para determinação das propriedades de produtos armazenados (granulares e pulverulentos), com a finalidade de adoção dos parâmetros necessários para o cálculo, pelo método semiprobabilístico, das ações e do fluxo de produtos armazenados em estruturas de armazenamento. Para determinação destas propriedades este autor utilizou farinha de trigo e grãos de colza em um aparelho de cisalhamento direto, de movimento de translação (máquina de ensaio TSG 70-140).

Em nível internacional, atualmente, as principais características dos produtos armazenados, principalmente de pós, são também determinadas pelo aparelho de cisalhamento de Jenike.

Estudar o efeito do tamanho das partículas e teor de umidade sobre o ângulo de atrito interno e a coesão de consolidação de pétalas de calêndula moída foi um dos objetivos do estudo desenvolvido por ZOU e BRUSEWITZ (2001), os quais concluíram que o efeito combinado do tamanho da partícula e do teor de umidade foi significativo no ângulo de atrito interno e na coesão, em que, amostras contendo partículas maiores e com baixo teor de umidade tiveram menores ângulos de atrito interno e coesão.

TEUNOU e FITZPATRICK (2000) determinaram as propriedades físicas de alguns pós: farinha de trigo, chá e trigo moído grosso, com o objetivo de avaliar o efeito do tempo de armazenamento e consolidação nas funções de fluxo dos mesmos e, para tais determinações, utilizaram a célula de carga de Jenike e uma bancada de consolidação e concluíram que, para os três produtos, a capacidade de fluxo ou escoamento diminuiu com o aumento do tempo de consolidação.

Determinar e comparar os parâmetros de fluxo de sementes de algodão, milho e soja, em função de três teores de umidade, foi o objetivo de DUFFY e PURI (1999). Com o estudo foi possível concluir que o ângulo de atrito interno do algodão e o do milho é similar para os conteúdos de umidade entre 8,3 e 12,8% e diferente para soja nesta mesma faixa de umidade, sendo esta propriedade função direta do teor de umidade do produto.

Para caracterizar o escoamento ou as propriedades de fluxo de alguns pós-alimentícios, TEUNOU et al. (1999) utilizaram a célula de carga de Jenike para determinar o ângulo de atrito do produto com a parede de aço liso para todos os produtos em teste.

Usando o mesmo equipamento, DUFFY e PURI (1996) determinaram os parâmetros de fluxo (coesão e ângulo de atrito interno) para açúcar de confeitaria e sabão em pó, tendo como fator de variação dois teores de umidade dos produtos, em que, para ambos os produtos, houve acréscimo na coesão com incremento do teor de umidade, sendo este aumento maior para o sabão. Já para o ângulo de atrito interno ocorreu uma inversão, ou seja, o aumento do teor de água do produto acarretou diminuição do ângulo, sendo mais marcante para o açúcar de confeitaria.

SCHWEDES (1996) concluiu que, para o projeto de silos, as propriedades físicas dos produtos armazenados devem ser exatamente conhecidas ou determinadas e que o melhor método e equipamento para tais determinações é o que foi desenvolvido por Jenike.

Trabalhando com farinha de trigo em diferentes teores de umidade, KAMATH et al. (1994) concluíram que o ângulo de atrito interno aumenta com o aumento do conteúdo de umidade do produto.

O estudo das propriedades físicas com ênfase na variação do tamanho, da forma, do teor de umidade e o tempo de consolidação é de grande importância, pois a fluxibilidade do produto armazenado é afetada por tais parâmetros (BMHB, 1985). A utilização destas propriedades, retiradas das tabelas fornecidas pelas normas internacionais, quando existem, conduzem a erros bastante significativos no projeto das pressões e fluxo em silos. Recomenda-se, quando possível, suas determinações por intermédio de vários testes.

Os estudos de produtos cujas propriedades ainda não foram determinadas devem ser realizados com o objetivo de ampliar a disponibilidade de dados para engenheiros e projetistas. Para o caso específico do café, o conhecimento sobre tais propriedades e dos fatores que as afetam é indispensável a um projeto estrutural econômico e seguro de estruturas e equipamentos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho foi a determinação das propriedades físicas e de fluxo dos grãos de café, para fins de granelização, que é de fundamental importância para o cálculo de fluxo e pressões em silos, e indispensáveis a um projeto estrutural econômico e seguro de equipamentos e silos, visando sempre à manutenção da qualidade do produto.

### **2.2. Objetivos Específicos**

Este trabalho foi desenvolvido com os seguintes objetivos específicos:

- Determinar e avaliar as propriedades físicas (ângulos e coeficientes de atrito estático e dinâmico com a parede, ângulo de repouso, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno e massa específica aparente) dos grãos de café e o comportamento deste produto, em função do teor de umidade, do tempo de consolidação e dos diferentes materiais de parede.

- Comparar os resultados das propriedades físicas instantâneas, determinados por equipamentos experimentais mais simples e de fácil construção e operação, com o equipamento de cisalhamento de Jenike, utilizado como padrão pelas principais normas internacionais de silos.

- Comparar os resultados da massa específica aparente, obtidos na célula de cisalhamento de Jenike com os determinados por uma balança de peso hectolítrico.
- Determinar a função fluxo dos grãos de café em função do teor de umidade e do tempo de consolidação.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Laboratório de Pré-Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) e no Laboratório de Propriedades Físicas e Avaliação de Qualidade de Produtos Agrícolas do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), ambos localizados no Campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG.

Foram utilizados grãos de café com pergaminho, das espécies *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora*, variedades Catuaí-Vermelho e Conillon, respectivamente, provenientes do município de Viçosa, MG.

O produto foi homogeneizado e colocado para secar em um secador experimental de camada fina, com ventilação forçada de ar, à temperatura de  $40 \pm 1^\circ\text{C}$ . No processo de secagem, foram obtidos os seguintes teores de umidade: 13,10, 15,53, 18,09, 20,66 e 25,91% b.s. e 11,98, 14,82, 17,72, 20,11 e 22,82% b.s., para as variedades Conillon e Catuaí-Vermelho, respectivamente, os quais foram determinados pelo método da estufa ( $105 \pm 3^\circ\text{C}$ ), em um período de 24 horas (BRASIL, 1992).

A determinação das propriedades físicas (ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo e coeficiente de atrito com a parede) foi feita utilizando-se um equipamento de cisalhamento direto, com movimento de translação modelo TSG 70-140, construído com base no aparelho de cisalhamento de Jenike. A função fluxo foi calculada e determinada indiretamente também por este

equipamento através do fornecimento de dados indispensáveis ao cálculo desta propriedade. A metodologia empregada, tanto para os testes instantâneos quanto para os testes com tempo de consolidação e ensaios com parede, foi a proposta por MILANI (1993), sendo que, para a execução dos ensaios, foram utilizadas as recomendações da norma inglesa – BMHB (1985), JENIKE e JOHANSON (1979). Os resultados determinados por este equipamento serviram como referência para as comparações, visto ser este o equipamento-padrão e oficial de muitas normas internacionais de silos.

Para determinação da massa específica aparente, os resultados determinados pela célula de cisalhamento de Jenike foram comparados com os de uma balança de peso hectolítrico, de capacidade de um litro, equipamento este adotado oficialmente por muitas normas internacionais.

### **3.1. Equipamento de Cisalhamento de Jenike**

O aparelho de cisalhamento de Jenike (Foto 3) é equipado com uma célula de cisalhamento de forma circular (Figuras 4 e 6), a qual é colocada sobre a base da máquina; um pendural com pesos, para aplicação de uma carga vertical, por gravidade, na célula; uma haste de carga acionada eletromecanicamente, a qual promove a ação de cisalhamento e move-se horizontalmente a uma velocidade constante entre 1 e 3 mm.min<sup>-1</sup>; uma célula de carga para medir a força de cisalhamento; e um registrador para indicação dessa força.



Foto 3 – Aparelho de cisalhamento de Jenike.

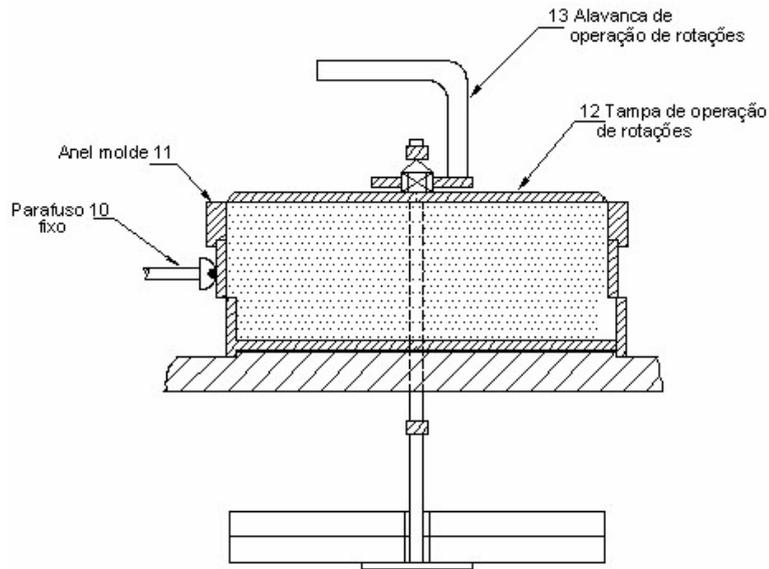


Figura 4 – Célula de cisalhamento de Jenike (Fonte: MILANI, 1993).

Para determinação dos efeitos do tempo sobre a consolidação de produtos armazenados é utilizada uma bancada de consolidação em conjunto com o aparelho de cisalhamento. A bancada consiste de seis conjuntos (Figura 5), onde as células do aparelho de cisalhamento após a consolidação e pré-cisalhamento da amostra são transferidas, a fim de permanecerem durante um tempo predeterminado sob a ação de uma força vertical estática, por meio do pendural de pesos com cargas. Durante a consolidação, as células com o produto são colocadas dentro de campânulas semi-herméticas de vidro para preservar o teor de umidade contido na amostra em análise.

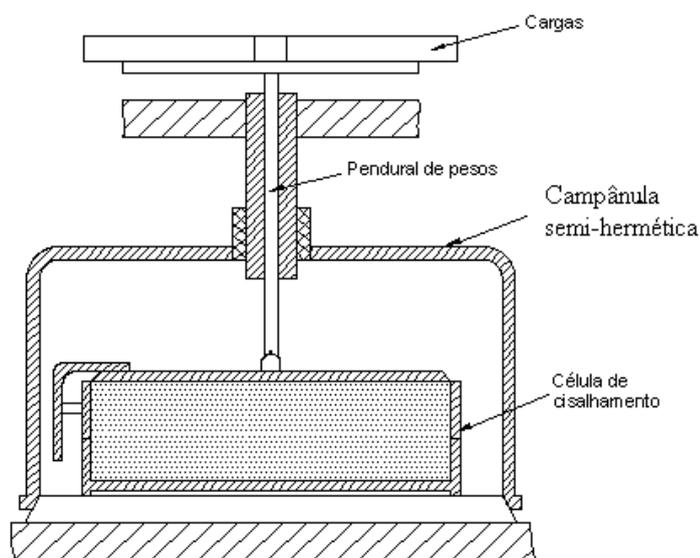


Figura 5 – Detalhe de um conjunto da bancada de consolidação (Fonte: MILANI, 1993).

### 3.2. Teste de Cisalhamento

A célula de cisalhamento de Jenike (Figura 7), consiste de: anel base (1); anel de cisalhamento (2); tampa de cisalhamento (3); suporte (4) e pino de carga (5). Antes do cisalhamento, o anel é colocado na posição ofsete, como mostra a Figura 6, e uma força vertical ( $F_V$ ) é aplicada na tampa e, conseqüentemente, nas partículas do produto dentro da célula, por meio de um pendural de pesos (6) com carga (7). A força horizontal é aplicada ao suporte por uma haste de medida (8), acionada mecanicamente, a qual transmite a força em uma velocidade constante de  $3 \text{ mm.min}^{-1}$ . A haste é fixada a um sistema de forças e, através de um transdutor, mede a força de cisalhamento ( $F_S$ ). Durante a operação de cisalhamento, o anel de cisalhamento move-se da posição ofsete original, mostrado na Figura 6, para a posição ofsete, apresentada na Figura 7. Nesta direção, o anel de cisalhamento pode percorrer até o fim uma distância máxima correspondente à soma da espessura das paredes da base e do anel de cisalhamento.

Durante o cisalhamento, dentro da célula, na amostra em teste, desenvolve-se uma zona de cisalhamento. Portanto, é especialmente importante que o cisalhamento ocorra no plano de cisalhamento, plano entre a base e o anel, nem acima nem abaixo.

Para preparação da amostra, inicialmente o anel de cisalhamento foi colocado em cima da base na posição ofsete, mostrado nas Figuras 4 e 6, por meio de uma pressão suave do anel contra o parafuso fixo (10), mostrado nas Figuras 5 e 8. O anel-molde (11) é colocado sobre o anel de cisalhamento (Figura 4) e a célula é enchida com o produto sendo o excesso raspado e nivelado com o topo do anel-molde. A tampa de rotações (12) é colocada sobre a superfície nivelada do produto e sobre ela uma carga (7) é aplicada por meio de um pendural de pesos (6) de carga total  $W_C$ , desta maneira, compactando o produto durante a etapa de rotação. Depois, são removidos o pendural com as cargas, a tampa de rotações e o anel-molde. O produto é novamente raspado e nivelado com o topo do anel de cisalhamento. A seguir, a tampa de cisalhamento é colocada sobre a superfície nivelada, como ilustra a Figura 7. Logo depois, ela é carregada com pendural de pesos, de carga  $W_P$ , e o teste de cisalhamento é realizado pelo avanço da haste, registrando-se a força de cisalhamento  $F_S$  na distância total a ser cisalhada.

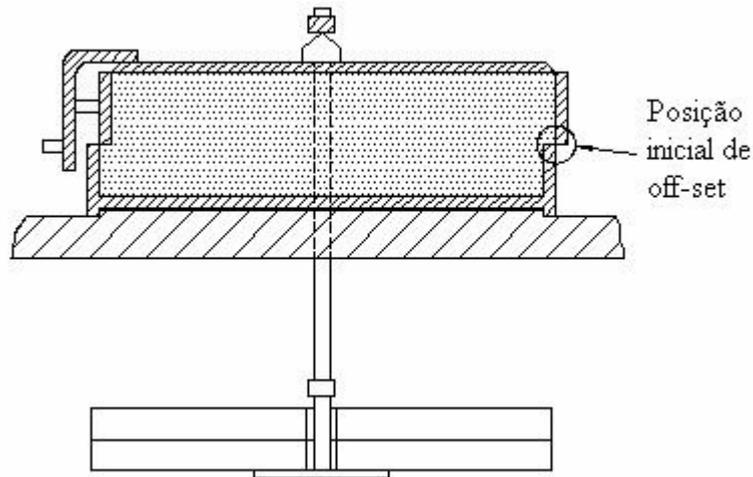


Figura 6 – Célula de cisalhamento de Jenike na posição inicial (ofsete) (Fonte: MILANI, 1993).

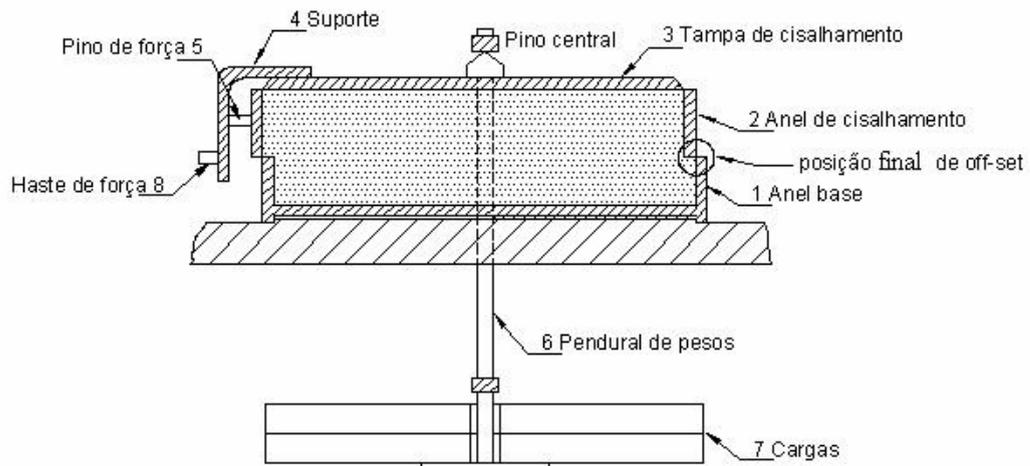


Figura 7 – Célula de cisalhamento de Jenike na posição final de (ofsete) (Fonte: MILANI, 1993).

O teste de cisalhamento é constituído de duas partes. A primeira é a preparação da amostra, que objetiva a consolidação crítica, para o desenvolvimento de uma zona de cisalhamento, dentro da qual ocorra fluxo de estado estável, onde a densidade e a tensão de cisalhamento permanecem constantes durante o teste. Na segunda parte do teste, a medição real das tensões de cisalhamento é realizada com valores de cargas normais  $W_s$ , determinando as forças de cisalhamento necessárias para o deslizamento do produto.

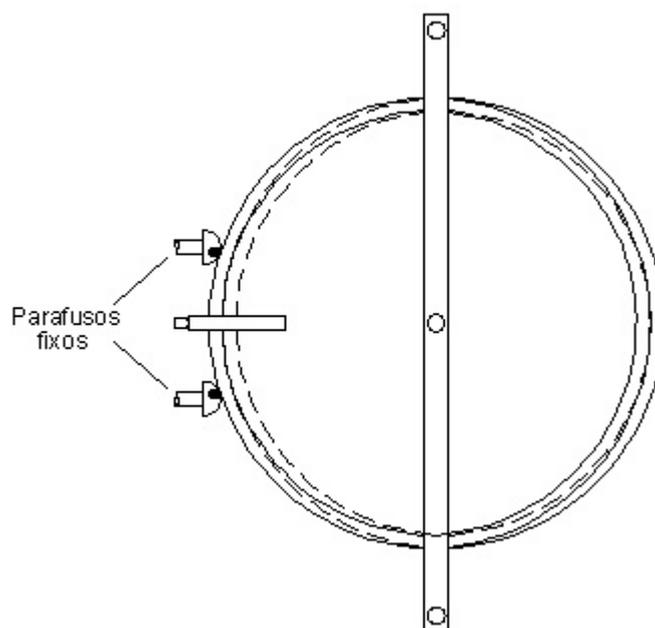


Figura 8 – Vista de cima da célula de cisalhamento de Jenike, mostrando a posição ofsete (Fonte: MILANI, 1993).

A célula de cisalhamento de Jenike é limitada a uma distância de cisalhamento de aproximadamente 6 mm, o que corresponde a soma da espessura das paredes da célula, as quais possuem 3 mm, portanto, o fluxo de estado estável deverá ser alcançado dentro de uma distância de cisalhamento em torno de 4 a 5 mm, deixando sobrar uma distância para o teste real de cisalhamento. A técnica para se obter um fluxo de estado estável em curta distância de cisalhamento, desenvolvido por Jenike, chamada de consolidação, consiste de operações de rotações e de pré-cisalhamento (*pre-shear*).

O arranjo da célula de cisalhamento de Jenike para a operação de rotação é mostrado na Figura 4. Um anel-molde é colocado sobre o anel de cisalhamento e a célula é cheia com o produto do teste. O excesso do material é raspado e nivelado com o topo do molde do anel e a tampa de operação de rotações (12) é colocada sobre o produto. Depois, o pendural de pesos com cargas ( $W_C$ ) é aplicado e a alavanca de operações de rotações (13) é ajustada na tampa. Um certo número de rotações é realizado com a alavanca. Depois das rotações, a alavanca, o pendural de pesos, a tampa de rotações e o anel-molde são removidos e o produto é novamente raspado e nivelado com o nível do topo do anel de cisalhamento.

A tampa de cisalhamento é depois colocada sobre o produto nivelado e uma seleção de cargas  $W_p$  é aplicada por meio de um pendural de pesos. Um teste de cisalhamento é realizado na distância total de cisalhamento e a força de cisalhamento é medida e marcada. Se a carga se encontrar subconsolidada, uma carga maior ( $W_c$ ) e, ou, um número maior de rotações deve ser aplicado na tampa. Se a amostra é sobreconsolidada, a carga ( $W_c$ ) e, ou, o número de rotações deverá ser reduzido. Deste modo, é possível, por tentativas, encontrar uma combinação entre a carga ( $W_c$ ) e o número de rotações, tal que a seleção de cargas ( $W_t$ ) e a força de cisalhamento marcadas, indiquem a presença da consolidação crítica da amostra. Esta operação é chamada de otimização.

A primeira parte do teste de cisalhamento, conseqüentemente, consiste da preparação da consolidação crítica da amostra pela otimização e depois o pré-cisalhamento da amostra com uma seleção das cargas ( $W_c$ ) para desenvolver um plano de cisalhamento dentro da qual ocorra fluxo de estado estável.

Tendo alcançado esta estabilidade, a haste de medida de força é retraída e, portanto, a força de pré-cisalhamento cai a zero (Figura 9). Na segunda parte, a carga de pré-cisalhamento ( $W_p$ ) é substituída por uma carga menor de cisalhamento ( $W_s$ ), a célula de carga é acionada novamente e a força é medida por intermédio da haste na direção já desenvolvida. Quando a haste toca o suporte, a força de cisalhamento aumenta rapidamente, indo direto a um valor máximo, representando a força de cisalhamento de deslizamento, e depois ela começa a diminuir. Esta parte do teste é chamada de cisalhamento.

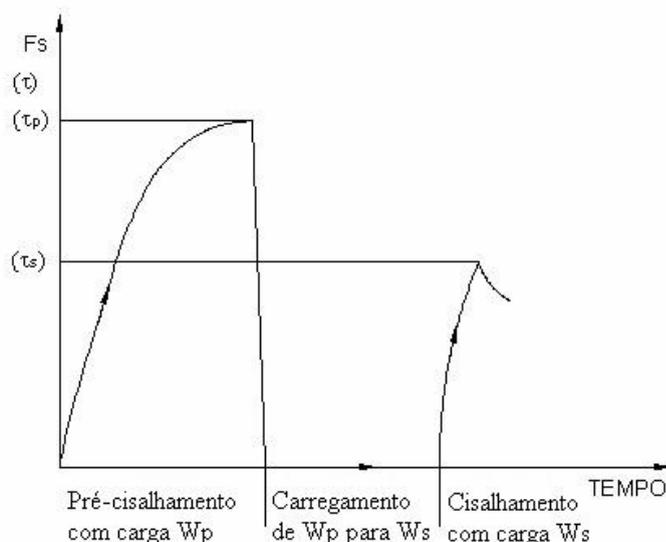


Figura 9 – Curvas de força-tensão e pré-cisalhamento e cisalhamento (Fonte: MILANI, 1993).

A haste de medida de força transmite a força de cisalhamento a ser medida no plano de cisalhamento entre a base e o anel e, conseqüentemente, a correspondente força normal neste plano, já determinada anteriormente. Na célula de cisalhamento de Jenike, esta força normal ( $F_V$ ) é uma força vertical produzida pela combinação das cargas: carga ( $W_S$ ); pendural de pesos ( $H$ ); tampa de cisalhamento ( $W_L$ ); anel de cisalhamento ( $W_T$ ) e o material dentro do anel sobre o plano de cisalhamento ( $W_m$ ).

Tensões de pré-cisalhamento são designadas por  $\sigma_P$  e  $\tau_P$  (ponto de pré-cisalhamento, P) e as tensões de deslizamento por  $\sigma_S$  e  $\tau_S$  (ponto de cisalhamento, S).

Os resultados dos testes de cisalhamento são plotados em um diagrama  $\sigma$  versus  $\tau$ , como ilustrados na Figura 10. No exemplo desta figura é mostrado um ponto P pelo círculo vazio e quatro pontos de cisalhamento identificados pelos círculos cheios ( $S_1$  a  $S_4$ ). Os pontos de cisalhamento pertencem a um ponto de pré-cisalhamento sendo unidos por uma reta, chamada de lugar geométrico (YL). O círculo de Mohr 1 (círculo de Mohr de estado estável) é desenhado através do ponto de pré-cisalhamento P e, tangencialmente, ao lugar geométrico extrapolado (o ponto de tangência é ilustrado na Figura 10 como B e define o ponto final do lugar geométrico). O segundo círculo de Mohr (círculo de Mohr de resistência inconfiada) é desenhado, passando através da origem e tangente ao lugar geométrico extrapolado (este ponto de tangência é representado por A na Figura 10). Os pontos válidos de deslizamento devem ficar entre os pontos de tangência A e B.

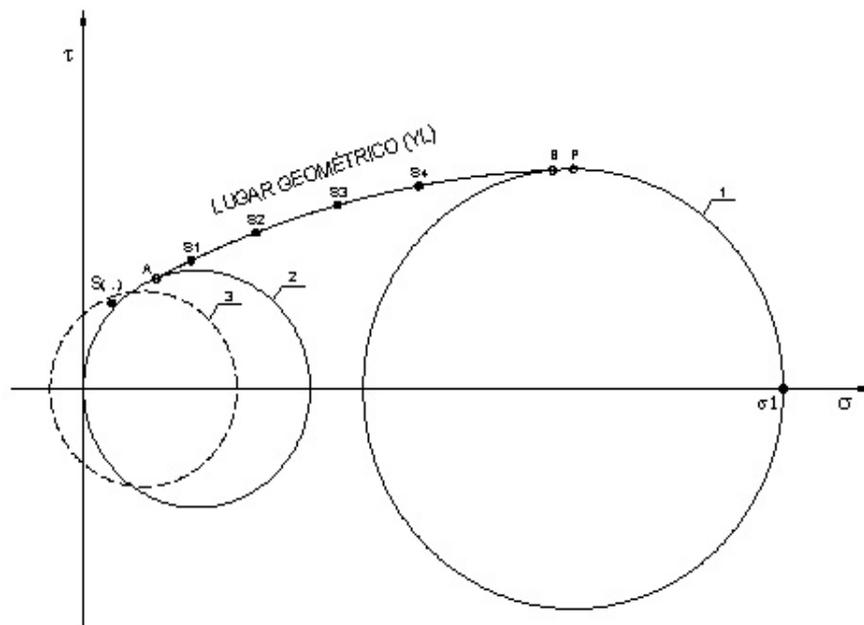


Figura 10 – Lugar geométrico de deslizamento (Fonte: MILANI, 1993.)

Quando um produto é solicitado a uma carga normal ou a um esforço de compressão por algum tempo, ele pode ganhar resistência. Esta resistência adquirida pode ser medida na célula de cisalhamento de Jenike, sendo assim possível avaliar o efeito do tempo de consolidação.

O conhecimento do efeito tempo de consolidação é obtido através do seguinte procedimento: uma amostra consolidada criticamente é preparada e pré-cisalhada com carga  $W_p$ . Depois de atingir o fluxo estável, o avanço da haste de força é parado sem ela ser recolhida. A zona de cisalhamento formada desta maneira permanece sob as tensões normal e de cisalhamento correspondente a um fluxo estável e é utilizada por um tempo definido. Depois da haste ser retraída, a força de cisalhamento cairá a zero e o teste de cisalhamento poderá ser realizado normalmente.

Os testes com tempo de consolidação são feitos com a ajuda de uma bancada de consolidação, constituída de seis células, as quais podem ser independentemente carregadas (Figura 5). Os testes são realizados em etapas. Usando o aparelho de cisalhamento, as amostras são preparadas e pré-cisalhadas com cargas  $W_p$ , no modo normal, e a haste de força é retraída depois do pré-cisalhamento. Em seguida, as células de cisalhamento (base, anel, tampa de cisalhamento e material) são transferidas para a bancada de consolidação, onde são carregadas com a colocação de uma carga  $W_t$ , diretamente sobre a tampa ou via um pendural carregado. Depois de transcorrido o intervalo de tempo específico, a célula é transferida para o aparelho de cisalhamento e uma carga  $W_s$  é selecionada e o teste de cisalhamento é realizada normalmente.

A carga  $W_t$  deve ser selecionada de tal forma que o estado de tensões na amostra durante o tempo de consolidação seja o mesmo do pré-cisalhamento. Durante o pré-cisalhamento atuam as tensões normal e de cisalhamento nas amostras. Contudo, na bancada de consolidação, somente a carga normal pode ser aplicada. Nos testes com tempo de consolidação o lugar geométrico é determinado da mesma forma que no instantâneo, sendo o lugar geométrico chamado de lugar geométrico de tempo (TYL).

Quando se mede o atrito entre um produto e uma amostra de material de parede do silo, a base da célula de cisalhamento é substituída por uma amostra do material. A amostra contida na parte superior da célula de cisalhamento (o anel e tampa de cisalhamento) é cisalhada sobre a amostra de material de parede, sob diferentes tensões normais ( $\sigma_w$ ) e os valores das tensões de cisalhamento  $\tau_w$  são

medidos. O ângulo de atrito da parede,  $\phi_w$ , é obtido da relação  $\tau_w/\sigma_w$ , por exemplo,  $\phi_w = \arctan(\tau_w/\sigma_w)$ . O lugar geométrico da parede é uma linha reta ligando os pares dos valores medidos  $\sigma_w$  e  $\tau_w$ .

### 3.3. Determinação das propriedades físicas do café determinadas pelo equipamento de cisalhamento de Jenike

O equipamento de Jenike, modelo TSG 70-140, utiliza duas células de cisalhamento que são diferenciadas em função das dimensões e das áreas de suas seções transversais, tamanho I (70 cm<sup>2</sup>) e II (140 cm<sup>2</sup>). Para realização dos testes foi utilizada a célula de tamanho I, visto não haver diferença significativa entre os resultados por ela obtidos quando comparados com os da célula de tamanho II, fato este que pode ser observado no apêndice. Para os testes instantâneos, utilizou-se a célula confeccionada em alumínio e para os testes com tempo de consolidação as de aço foram utilizadas, sendo que ambas possuem aproximadamente as mesmas dimensões.

Os níveis das cargas normais utilizadas no teste de cisalhamento foram os mesmos utilizados por MILANI (1993) e CALIL JÚNIOR (1997) e estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Níveis de cargas em daN utilizadas nas etapas de pré-cisalhamento ( $W_p$ ) e cisalhamento ( $W_s$ ) da amostra, para determinação dos lugares geométricos (YL)

IYL 1	IYL 1	IYL 2	IYL 2	IYL 3	IYL 3
$W_p$	$W_s$	$W_p$	$W_s$	$W_p$	$W_s$
10,0	7,0	7,0	5,0	5,0	3,5
10,0	5,0	7,0	3,5	5,0	2,0
10,0	3,5	7,0	2,0	5,0	1,0

A otimização, como já comentado anteriormente, é um conjunto de testes preliminares, feitos com a intenção de verificar o nível de consolidação da amostra e para que ela obtenha a consolidação crítica. Através destes testes ficou definido que, para este trabalho, as rotações e cargas normais para preparação da amostra estão representadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Níveis de cargas  $W_C$  (daN) e rotações (rpm) utilizadas na etapa de preparo da amostra

Variedade	Carga de Pré-Cisalhamento $W_P$ (daN)	Carga $W_C$ (daN)	Rotações (rpm)
Conillon	10	20	25
Conillon	7	15	25
Conillon	5	10	25
Catuaí-Vermelho	10	20	30
Catuaí-Vermelho	7	15	30
Catuaí-Vermelho	5	10	30

### 3.3.1. Determinação do ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ) e do efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ) instantâneos

Em virtude da variação das propriedades físicas e considerando a natureza probabilística das ações em silos, além dos valores médios determinados pelas repetições, também foram informados os valores superiores e inferiores das propriedades, de acordo com CALIL JÚNIOR et al. (1997).

Os lugares geométricos e, conseqüentemente, as propriedades físicas dos grãos de café foram determinados para cada variedade e teor de umidade em três repetições.

O produto para uma dada condição de consolidação (pré-cisalhamento) foi cisalhado sob várias cargas normais,  $W_s$  (Tabela 1). Deste modo, foi determinado por regressão, o lugar geométrico de deslizamento instantâneo (YL), o qual formará com a horizontal o ângulo de atrito interno instantâneo ( $\phi_i$ ), como ilustrado na Figura 11.

A Figura 11 ilustra um lugar geométrico instantâneo com um ponto de pré-cisalhamento P. O maior semicírculo de Mohr (de estado estável,  $\sigma_1$ ) foi desenhado através do ponto de pré-cisalhamento P e tangencialmente, ao lugar geométrico extrapolado (o ponto de tangência B, define o ponto final do lugar geométrico). O menor semicírculo de Mohr (de resistência não-confinada,  $f_c$ ) foi desenhado, passando através da origem e tangente ao lugar geométrico extrapolado (este ponto de tangência é representado por A). Os pontos válidos de deslizamento instantâneo ficarão entre os pontos de tangência A e B.

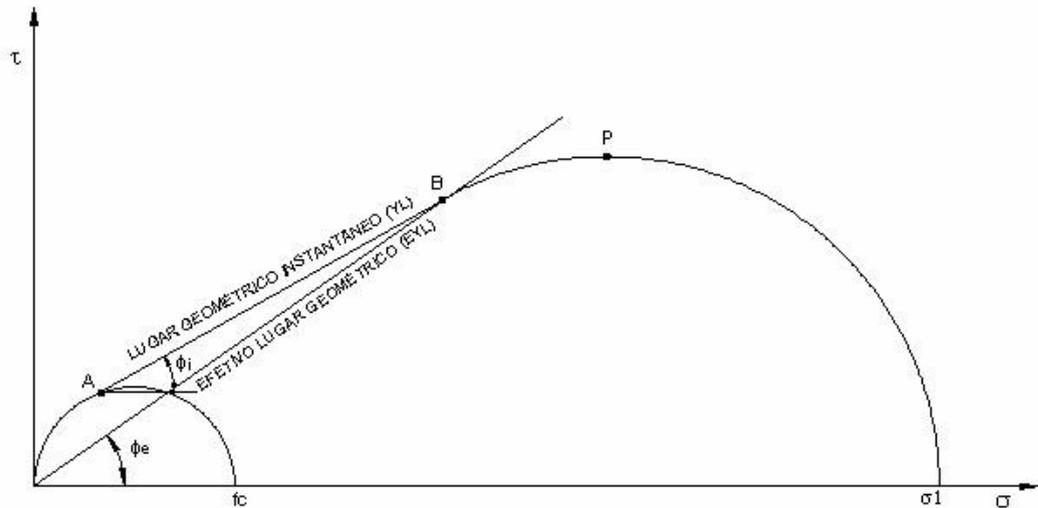


Figura 11 – Lugares geométricos e ângulos de atrito (Fonte: MILANI, 1993).

O efetivo lugar geométrico foi determinado traçando-se uma linha reta passando através da origem do plano  $\sigma \times \tau$  e tangente ao semicírculo de Mohr de estado estável durante fluxo contínuo.

- Cálculo das tensões normais, de cisalhamento e da densidade do produto

- Densidade do produto ( $\gamma$ ):

$$\gamma = \frac{W_t - (W_b + W_r + W_l)}{V_t} \quad (8)$$

- Tensões de cisalhamento de pré-cisalhamento ( $\tau_p$ ) e cisalhamento ( $\tau_s$ ):

$$\tau_p = \frac{F_{sp}}{A} \cdot g \quad (9)$$

$$\tau = \tau \cdot \frac{\bar{\tau}_p}{\tau_p} \quad (10)$$

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{pi}}{n} \quad (11)$$

$$\tau = \frac{F_{ss}}{A} \cdot g \quad (12)$$

- Tensões normais de pré-cisalhamento ( $\sigma_p$ ) e cisalhamento ( $\sigma_s$ ):

$$\sigma_p = \frac{H + W_p + W_r + W_L + \gamma + V_r}{A} \cdot g \quad (13)$$

$$\sigma_s = \frac{H + W_s + W_r + W_L + \gamma + V_r}{A} \cdot g \quad (14)$$

$$\bar{\sigma}_p = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{pi}}{n} \quad (15)$$

em que

Wt = massa total da célula de cisalhamento com o produto, kg;

Wb = massa da base do anel, kg;

Wr = massa do anel de cisalhamento, kg;

W<sub>L</sub> = massa da tampa de cisalhamento, kg;

H = massa do pendural de cargas, kg;

Vt = volume total da célula de cisalhamento, m<sup>3</sup>;

Vr = volume do anel de cisalhamento, m<sup>3</sup>;

A = área da secção transversal da célula, m<sup>2</sup>;

g = constante gravitacional, m.s<sup>-2</sup>;

F<sub>sp</sub> = força de cisalhamento de pré-cisalhamento/estado estável, N;

F<sub>ss</sub> = força de cisalhamento/deslizamento, N;

W<sub>p</sub> = carga sobre o pendural de pesos no pré-cisalhamento, daN;

W<sub>s</sub> = carga sobre o pendural de pesos no cisalhamento, daN; e

N = número de testes com uma carga de pré-cisalhamento.

### 3.3.2. Determinação do lugar geométrico de tempo, do efetivo lugar geométrico de tempo e das propriedades físicas de tempo

Os testes com tempo de consolidação foram realizados com a utilização de uma bancada de consolidação, constituída de seis células, as quais foram independentemente carregadas. Os testes foram realizados em etapas. Usando o aparelho de cisalhamento, as amostras foram preparadas e pré-cisalhadas com cargas W<sub>p</sub> (Tabela 3), no modo instantâneo, já descrito anteriormente. Em seguida, as células de cisalhamento foram transferidas para a bancada de consolidação onde, em

seguida, foram carregadas com a colocação de uma carga igual à carga de pré-cisalhamento, ou seja,  $W_p$  (Tabela 3), carregadas diretamente sobre a tampa. Depois de transcorrido o intervalo de tempo de 6, 12, e 24 horas, a célula foi transferida para o aparelho de cisalhamento onde uma carga  $W_s$  (Tabela 3) foi aplicada e o teste de cisalhamento foi realizado normalmente, obtendo-se, assim, por regressão, uma linha reta chamada de lugar geométrico de tempo (TYL), que fica acima do lugar geométrico instantâneo mostrado na Figura 12. O TYL, quando traçado com relação à horizontal, formou o ângulo de atrito interno com tempo de consolidação ( $\phi_{it}$ ).

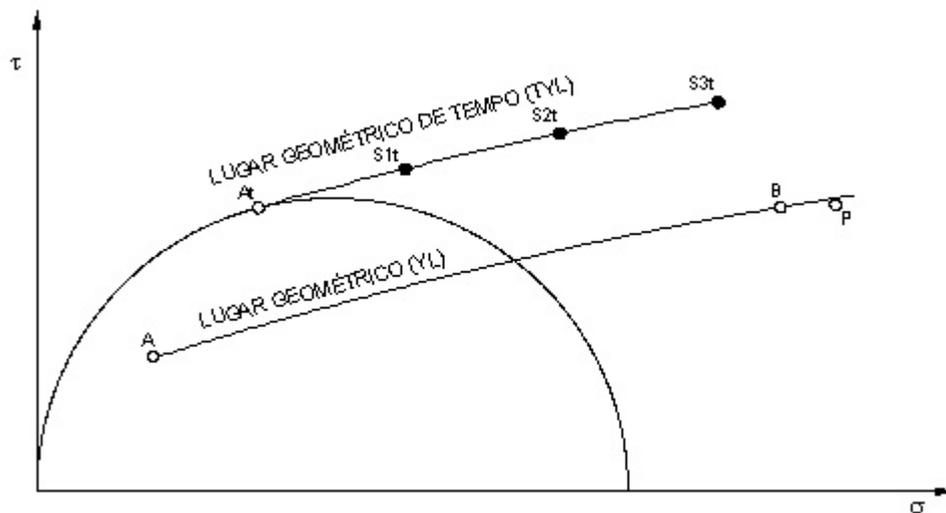


Figura 12 – Lugares geométricos de tempo (TYL) e instantâneo (YL) (Fonte: MILANI, 1993).

O efetivo lugar geométrico com tempo de consolidação (TEYL) foi determinado do mesmo modo que o instantâneo, só que, para esta nova situação de tensões, formou com a horizontal, o efetivo ângulo de atrito interno com tempo de consolidação ( $\phi_{et}$ ).

### 3.3.3. Determinação do lugar geométrico com a parede e das propriedades físicas de atrito externo

Para medir o atrito entre o produto e uma amostra de material da parede do silo, a base da célula de cisalhamento foi substituída por uma amostra deste material, que foram: aço liso, aço rugoso, madeira, concreto, polietileno e alumínio, por meio

da confecção de placas quadradas que mediam 150 x 150 mm de lado e 5 mm de espessura. O produto contido na parte superior da célula de cisalhamento (o anel e tampa de cisalhamento) foi cisalhado sobre a amostra de material da parede, sob diferentes cargas normais de 0, 1, 2, 3, 4 e 5 daN e os valores das forças de cisalhamento foram medidos. O lugar geométrico da parede (IWYL) é a linha que ligará os pares dos valores calculados de  $\sigma_w$  e  $\tau_w$ , e forma com a horizontal o ângulo de atrito com a parede ( $\phi_w$ ). O coeficiente de atrito com a parede ( $\mu'$ ) foi determinado matematicamente pela seguinte equação:

$$\mu' = \tan \phi_w \quad (16)$$

Para cada nível de carga normal, as tensões normal ( $\sigma_w$ ) e de cisalhamento ( $\tau_w$ ) foram calculadas, assim como a densidade do produto ( $\gamma$ ) no final do teste, sendo para isso utilizadas as seguintes equações:

- Densidade do produto armazenado ( $\gamma$ ):

$$\gamma = \frac{W_{wl} - (W_r + W_l + W_m)}{V_r} \quad (17)$$

- Tensão normal ( $\sigma_w$ ):

$$\sigma_w = \frac{(W_{wL} + W_w - W_m)}{A} \cdot g \quad (18)$$

- Tensão de cisalhamento ( $\tau_w$ ):

$$\tau_w = \frac{S_w}{A} \cdot g \quad (19)$$

em que

$W_{wt}$  = massa total da amostra incluindo anel de cisalhamento, tampa e produto armazenado, kg;

$W_m$  = massa da amostra de material da parede, kg;

$W_w$  = carga sobre o pendural de pesos do teste de atrito, daN;

$S_w$  = força de cisalhamento registrada, N;

$V_r$  = volume do anel de cisalhamento, m<sup>3</sup>;

$A$  = área da secção transversal da célula,  $m^2$ ;

$g$  = constante gravitacional,  $m.s^{-2}$ ;

$W_r$  = massa do anel de cisalhamento, kg; e

$WL$  = massa da tampa de cisalhamento, kg.

### 3.4. Caracterização do material de parede

A caracterização do material de parede foi representada pela rugosidade média ( $R_a$ ) das superfícies, medidas com a utilização de um rugosímetro portátil digital, modelo SJ-201, fabricado pela empresa japonesa Mitutoyo, em dez repetições, sendo esta rugosidade medida na mesma direção do deslocamento dos grãos.

Um dos parâmetros mais utilizados para caracterizar a superfície do material de parede é a rugosidade média das diferentes superfícies dos materiais empregados para a construção dos silos. A utilização da rugosidade média deve-se ao fato de ser o parâmetro de medição mais utilizado e aceito em todo o mundo para representar a rugosidade das superfícies, pois, por mais perfeitas que sejam, apresentam irregularidades conhecidas como rugosidade, que é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. Entre os sistemas de medida da rugosidade tem-se dois sistemas básicos, sendo um deles o da linha média, o qual é o mais utilizado e adotado oficialmente no Brasil. A linha média é a linha paralela à direção geral do perfil (superfície efetiva), no comprimento da amostragem ( $L_e$ ), de tal forma que a soma das áreas superiores ( $A_1$  e  $A_2$ ), compreendidas entre a linha e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores ( $A_3$ ), no comprimento de amostragem. A utilização da rugosidade média deve-se ao fato de esta propriedade ser a mais utilizada isoladamente para determinar a rugosidade das superfícies e que se refere à média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento ( $Y_i$ ) dos pontos do perfil de rugosidade em relação a linha média, dentro do percurso de medição, conforme Figura 13.

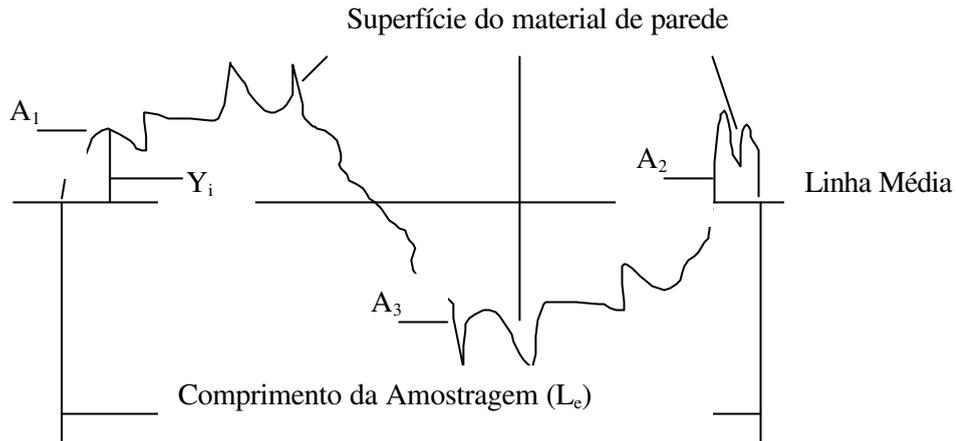


Figura 13 – Linha média para determinação da rugosidade média.

### 3.5. Determinação das propriedades físicas por intermédio do plano inclinado

As propriedades físicas – ângulos e coeficientes interno e externo de atrito estático –, foram determinadas em cinco repetições para o atrito interno e três para o atrito externo, ou seja, atrito com o material de parede. Para determinar o atrito externo foram utilizadas as mesmas placas confeccionadas e utilizadas nos testes com o equipamento de Jenike. Para o atrito interno, foram confeccionadas dez placas com as mesmas dimensões das usadas para o atrito externo, representando desta forma as duas variedades e os cinco teores de umidade, tendo estas bases de madeira e sobre elas foram colados de forma aleatória os grãos de café.

O equipamento é constituído de um plano inclinado móvel sobre o qual foram colocados e fixados os diferentes materiais de parede. Sobre as placas dos materiais de parede foi colocado um cilindro de PVC sem fundo e sem tampa, medindo 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura, de acordo com JOSHI et al. (1993). Dentro deste cilindro foi depositada uma massa de aproximadamente 150 g de grãos de café. Após o café ter sido colocado dentro do cilindro, o mesmo foi levemente erguido para que não existisse nenhum ponto de contato entre ele e a superfície do material de parede. Em seguida, o plano inclinado foi levemente erguido até o momento em que o cilindro começa a deslizar, o movimento então é cessado e a base fixada para as devidas medições. Com o plano inclinado forma-se um triângulo retângulo, onde a medida da base é conhecida e, por intermédio de um paquímetro digital, mediu-se a

altura da face superior do plano inclinado. De posse dessas informações, calcula-se o ângulo de atrito externo ( $\phi_w$ ) estático por intermédio da seguinte fórmula:

$$\phi_w = \frac{\text{Cateto oposto}}{\text{Cateto adjacente}} \quad (20)$$

Já o coeficiente de atrito estático ( $\mu'$ ) externo foi calculado da seguinte forma:

$$\mu' = \tan \phi_w \quad (21)$$

O mesmo procedimento foi adotado para determinação do ângulo e coeficiente estático interno, mudando somente a placa onde, para estas determinações, foi utilizada aquela confeccionada pelos próprios grãos.

Em virtude da variação das propriedades físicas, que deve ser considerada, além dos valores médios determinados pelas repetições, também foram informados os valores superiores e inferiores das propriedades, sendo este o mesmo procedimento adotado para as determinações feitas pelo equipamento de cisalhamento de Jenike.

### **3.6. Determinação das propriedades físicas por intermédio do equipamento experimental de arraste em conjugação com a máquina universal de teste**

As propriedades físicas – ângulos, coeficientes interno e externo de atrito estático e dinâmico –, foram determinadas em cinco repetições para o atrito interno e três para o atrito com a parede. As placas utilizadas foram as mesmas descritas no plano inclinado. O equipamento é composto por uma plataforma sobre a qual foi colocada e fixada a placa da superfície do material a ser testada e, sobre esta, foi colocada uma caixa de madeira em forma de cubo medindo 100 mm de lado. Nesta caixa foi colocada uma massa de aproximadamente 200 g de grãos e no topo desta foi colocada uma carga de 6 daN uniformemente distribuída sobre a massa de grãos onde, assim como no método anterior, o recipiente é levemente suspenso para que não exista nenhum ponto de contato do mesmo com a superfície do material em teste. Esta caixa está conectada por intermédio de um cabo de aço a uma máquina

universal de teste, a qual realiza um ensaio de tração a uma velocidade constante de  $0,64 \text{ mm.s}^{-1}$  em um trecho de 30 mm, sendo este cabo guiado por uma roldana que permite a realização de uma curva de  $90^\circ$  necessária para unir, por intermédio do cabo de aço, a caixa de madeira ao suporte da máquina universal de teste. O recipiente contendo o produto foi arrastado durante a realização do ensaio. A máquina universal de testes foi utilizada nos ensaios pela capacidade de realizar o ensaio de tração necessário, além de determinar as forças de atrito estática e dinâmica. Como pode ser observado na Figura 14, o pico inicial representa a força de atrito estático e a zona de estabilização seguinte, a força de atrito dinâmico, de acordo com BENEDETTI (1987).

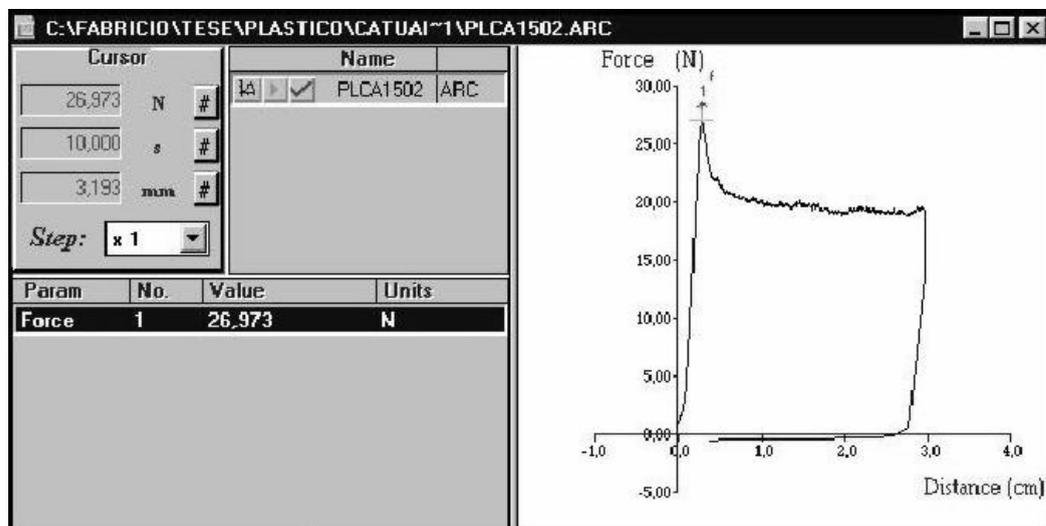


Figura 14 – Representação gráfica da força de atrito estático e dinâmico determinada pelo equipamento experimental de arraste.

O coeficiente de atrito é resultado da relação entre a força de atrito e a força normal sobre a superfície de contato. O coeficiente de atrito estático ( $\mu'$ ) externo foi calculado da seguinte forma:

$$\mu' = \frac{\text{força de atrito}}{\text{força normal}} \quad (22)$$

O ângulo de atrito externo ( $\phi_w$ ) foi calculado por intermédio da seguinte fórmula:

$$\phi_w = \text{arc tan } \mu' \quad (23)$$

O mesmo procedimento foi adotado para determinação do ângulo e coeficiente estático interno, mudando somente a placa onde, para estas determinações foi utilizada aquela confeccionada pelos próprios grãos. Para calcular o ângulo e coeficiente estático usa-se a força de atrito estático, já para o dinâmico usa-se a força de atrito dinâmico.

### **3.7. Determinação da função fluxo (FF)**

A capacidade do produto de fluir depende da resistência desenvolvida, devido à consolidação e, com isso, o produto é capaz de formar um arco estável ou efeito tubo (CALIL, 1990). A pressão de deslizamento não-confinada ( $f_c$ ) é uma medida da resistência do produto em uma superfície livre, apresentando a função da máxima pressão de consolidação. Essa função é denominada de função fluxo. Sua determinação foi feita traçando-se os pontos da tensão máxima de consolidação ( $\sigma_1$ ) em função da resistência não-confinada de deslizamento ( $f_c$ ), tensões estas determinadas por meio dos lugares geométricos de deslizamento obtidos na Figura 11. Foram traçados gráficos da tensão máxima de consolidação ( $\sigma_1$ ) em função da resistência não-confinada de deslizamento ( $f_c$ ).

Para determinação da função fluxo, os valores de  $f_c$  e  $\sigma_m$  ou  $\sigma_1$  foram calculados matematicamente por meio do conhecimento do ponto P da Figura 11 e da reta de regressão, que é o lugar geométrico de deslizamento, ou seja, pelo conhecimento de um ponto (P) e uma reta (YL).

O índice da função fluxo foi determinado também numericamente pela seguinte equação:

$$FF = \frac{\sigma_1}{F_c} \quad (24)$$

### **3.8. Determinação do ângulo de repouso ( $\theta$ )**

Para determinar o ângulo de repouso foi utilizada uma plataforma cilíndrica circular de diâmetro conhecido, contendo, em seu centro, uma haste graduada onde o produto foi depositado, proveniente de um funil de recepção de amostra de grãos a uma altura de 0,60 m. Em seguida, foi medida a altura do talude formado pelo

produto e a plataforma. De posse destas informações, foi calculado o ângulo de repouso.

### 3.9. Determinação da massa específica aparente ( $\rho_{ap}$ )

A massa específica aparente será determinada, para cada variedade e teor de umidade em cinco repetições, com a utilização da base e do anel da célula de cisalhamento (que possuem volumes e áreas conhecidas) e de uma balança de peso hectolítrico, com capacidade de um litro, marca Dallemole.

### 3.10. Análise estatística

As análises de variância e regressão foram realizadas empregando-se o programa computacional Sistema de Análise Estatística e Genética (SAEG). Foram estimados os valores dos parâmetros dos modelos em função das variáveis independentes, ou seja, teor de umidade e tempo de consolidação.

Para relacionar os parâmetros a serem estudados, optou-se pelo modelo estatístico apresentado a seguir:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 U_i + \beta_2 TC_j + E_{ij} \quad (25)$$

em que

$Y_{ij}$  = valores observados dos parâmetros, para o modelo em estudo, no teor de umidade  $i$  e tempo de consolidação  $j$ ;

$\beta_0$  = constante da regressão;

$\beta_n$  = coeficientes da regressão,  $n = 1$  e  $2$ ;

$U_i$  = teor de umidade para os níveis 11, 13, 15, 17 e 20 % b.u.;

$TC_j$  = tempo de consolidação para os níveis 0, 6, 12 e 24 h; e

$E_{ij}$  = erro aleatório.

O grau de ajuste do modelo aos dados experimentais foi efetuado com base na magnitude dos coeficientes de determinação ajustado e variação, na significância dos coeficientes de regressão, na verificação do ajuste do modelo estatístico aos dados experimentais e no erro médio relativo, conforme descrito a seguir:

$$P = \frac{1}{n} \cdot \sum \left( \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (26)$$

em que

P = erro médio relativo;

n = número de observações;

Y = valor observado experimentalmente; e

$\hat{Y}$  = valor estimado pelo modelo.

Com o objetivo de comparar os ângulos instantâneos e os resultados obtidos pelos diferentes equipamentos utilizados nos testes, para cada variedade (Conillon e Catuaí-Vermelho), as análises estatísticas dos resultados dos testes de atrito externo e interno foram feitas em delineamento inteiramente casualizado, seguindo um esquema fatorial 3 x 5, com três níveis de equipamentos (Jenike, plano inclinado e de arraste) e cinco níveis de umidade dos grãos (11, 13, 15, 17 e 20% b.u) para o atrito interno instantâneo e para cada um dos seis níveis de materiais de parede (aço liso, aço rugoso, madeira, concreto, polietileno e alumínio). Foram feitas três repetições para as propriedades de atrito externo e nove para o interno, determinado pelo equipamento de Jenike. Para os outros dois equipamentos foram realizadas cinco repetições. Foram determinados também os intervalos de confiança para os limites superior e inferior. Os dados foram interpretados estatisticamente, utilizando-se o programa estatístico SANEST, por análise de variância e comparação de médias pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Embora pouco usual, mas a título de caracterização do comportamento das propriedades analisadas do café, em função de seu teor de umidade, os resultados obtidos foram, também submetidos à análise de regressão. O modelo linear foi o que melhor representou a relação entre as variáveis estudadas e que mais adequadamente se ajustou aos dados experimentais.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Atrito externo**

#### **4.1.1. Coeficientes e ângulos de atrito estático e dinâmico**

Nos Quadros 1 e 2 são apresentados os valores médios das propriedades físicas instantâneas, coeficientes de atrito estático ( $\mu'_e$ ) e dinâmico ( $\mu'_d$ ), e nos Quadros 3 e 4, os ângulos de atrito estático ( $\phi_{we}$ ) e dinâmico ( $\phi_{wd}$ ) dos grãos de café das espécies variedades Catuaí-Vermelho e Conillon, com diferentes teores de umidade, determinados por três equipamentos, em distintos materiais de parede.

De acordo com MOHSENIN (1970), a maioria das propriedades físicas dos produtos agrícolas altera-se de acordo com a modificação do seu teor de umidade. Concordando com esta afirmação, pode-se observar com os resultados obtidos e apresentados nos Quadros 1 a 4, que existe uma tendência de acréscimo dos valores das características físicas estudadas com o aumento do teor de umidade em praticamente todos os materiais de parede empregados independentemente do equipamento utilizado para as análises. Assim como os resultados obtidos neste experimento, vários autores, trabalhando com os mais diversos tipos de produtos e materiais de parede, observaram a tendência de aumento dos coeficientes e ângulos de atrito com a elevação do teor de umidade da massa de grãos, independentemente do material de parede empregado, dentre eles: GHOSH (1968); FRASER et al.

Quadro 1 – Valores médios dos resultados dos coeficientes de atrito com a parede dos grãos de café da variedade Catuaí-Vermelho determinados por diferentes equipamentos com distintos materiais de parede, em função do teor de umidade do produto

Teor de Umidade (% b.s.)	Equipamento				
	Jenike	Plano Inclinado	Arraste	Jenike	Arraste
	Coeficiente de Atrito Estático			Coeficiente de Atrito Dinâmico	
		Alumínio		Alumínio	
11,98	0,1537 C c	0,2547 A c	0,1961 B b	0,1489 B c	0,1780 A b
14,82	0,1595 C bc	0,2654 A c	0,2044 B b	0,1536 B bc	0,1841 A b
17,72	0,1649 C bc	0,2853 A b	0,2251 B a	0,1614 B b	0,2044 A a
20,11	0,1676 C ab	0,2975 A b	0,2253 B a	0,1644 B ab	0,2083 A a
22,82	0,1807 C a	0,3243 A a	0,2310 A a	0,1736 B a	0,2182 A a
		Polietileno		Polietileno	
11,98	0,2249 C a	0,2884 B a	0,3127 A a	0,1909 B a	0,2165 A a
14,82	0,2251 C a	0,2907 B a	0,3142 A a	0,1926 B a	0,2182 A a
17,72	0,2279 C a	0,2927 B ab	0,3159 A a	0,1975 B a	0,2256 A a
20,11	0,2287 C a	0,2977 B ab	0,3161 A a	0,2018 B a	0,2263 A a
22,82	0,2288 C a	0,2980 B a	0,3221 A a	0,2054 B a	0,2277 A a
		Aço Liso		Aço Liso	
11,98	0,2232 C c	0,3127 A d	0,2889 B e	0,1850 B c	0,2358 A e
14,82	0,2274 C bc	0,3348 A c	0,3073 B d	0,1861 B c	0,2596 A d
17,72	0,2386 B abc	0,3455 A c	0,3462 A c	0,221 B b	0,2953 A c
20,11	0,2413 C ab	0,3552 B b	0,3795 A b	0,2224 B b	0,3329 A b
22,82	0,2486 C a	0,3768 B a	0,4398 A a	0,2392 B a	0,3833 A a
		Madeira		Madeira	
11,98	0,3045 C c	0,3523 B c	0,4215 A d	0,2789 B c	0,3641 A c
14,82	0,3090 C bc	0,3850 B b	0,4472 A d	0,2816 B a	0,3776 A c
17,72	0,3332 C b	0,3942 B b	0,4782 A c	0,3207 B b	0,4099 A b
20,11	0,3661 C a	0,4208 B a	0,5536 A b	0,3516 B a	0,4841 A a
22,82	0,3879 C a	0,4289 B a	0,5899 A a	0,3742 B a	0,5002 A a
		Concreto		Concreto	
11,98	0,4086 C a	0,4291 B d	0,5516 A d	0,3949 B a	0,5174 A c
14,82	0,4209 C a	0,4372 B cd	0,5843 A c	0,4039 B a	0,5527 A bc
17,72	0,4336 C a	0,4552 B bc	0,6072 A b	0,4210 B a	0,5716 A ab
20,11	0,4488 C a	0,4756 B b	0,6190 A ab	0,4357 B a	0,5907 A b
22,82	0,4507 C a	0,5133 B a	0,6269 A a	0,4364 B a	0,5938 A a
		Aço Rugoso		Aço Rugoso	
11,98	0,4523 C c	0,5190 B b	0,6182 A d	0,4404 B b	0,5858 A b
14,82	0,4657 C bc	0,5297 B ab	0,6528 A c	0,4540 B ab	0,6021 A b
17,72	0,4677 C abc	0,5307 B ab	0,6664 A c	0,4556 B ab	0,6240 A ab
20,11	0,4873 C ab	0,5428 B a	0,6934 A b	0,4731 B a	0,6285 A ab
22,82	0,4879 C a	0,5506 B a	0,7283 A a	0,4736 B a	0,6497 A a

Para cada teste realizado, as médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem, estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Quadro 2 – Valores médios dos resultados dos coeficientes de atrito com a parede dos grãos de café da variedade Conillon determinados por diferentes equipamentos com distintos materiais de parede, em função do teor de umidade do produto

Teor de Umidade (% b.s.)	Equipamento					
	Jenike	Plano Inclinado	Arraste	Jenike	Arraste	
	Coeficiente de Atrito Estático			Coeficiente de Atrito Dinâmico		
		Alumínio			Alumínio	
13,10	0,1528 C c	0,2385 A b	0,2049 B b	0,1475 B c	0,1906 A c	
15,53	0,1606 C bc	0,2454 A b	0,2273 B b	0,1558 B bc	0,2098 A b	
18,09	0,1615 C bc	0,2464 A b	0,2438 B a	0,1568 B abc	0,2199 A ab	
20,66	0,1687 C ab	0,2550 A b	0,2587 B a	0,1639 B ab	0,2273 A a	
25,91	0,1768 C a	0,2793 A a	0,2626 B a	0,1714 B a	0,2333 A a	
		Polietileno			Polietileno	
13,10	0,1947 B a	0,2368 A a	0,2385 A a	0,1782 B a	0,1930 A a	
15,53	0,1951 B a	0,2373 A a	0,2386 A a	0,1785 B a	0,1935 A a	
18,09	0,1960 B a	0,2374 A a	0,2426 A a	0,1788 B a	0,1949 A a	
20,66	0,2030 B a	0,2419 A a	0,2444 A a	0,1793 B a	0,1991 A a	
25,91	0,2037 B a	0,2493 A a	0,2469 A a	0,1818 B a	0,1993 A a	
		Aço Liso			Aço Liso	
13,10	0,2008 C c	0,2333 B e	0,2607 A c	0,1764 B d	0,2431 A d	
15,53	0,2017 C c	0,2457 B d	0,3311 A c	0,1904 B cd	0,2802 A c	
18,09	0,2201 C bc	0,2487 B c	0,4332 A c	0,2040 B c	0,3641 A b	
20,66	0,2330 C b	0,3237 B b	0,4806 A b	0,2268 B b	0,3786 A b	
25,91	0,2800 C a	0,3901 B a	0,5802 A a	0,2526 B a	0,4631 A a	
		Madeira			Madeira	
13,10	0,2789 B c	0,3071 B c	0,4389 A d	0,2784 B b	0,3767 A b	
15,53	0,2851 B bc	0,3107 B c	0,4493 A cd	0,2851 B b	0,3833 A ab	
18,09	0,2863 B bc	0,3205 B c	0,4633 A c	0,2863 B b	0,3847 A ab	
20,66	0,2899 C b	0,3468 B b	0,4939 A b	0,2899 B b	0,3879 A ab	
25,91	0,3256 C a	0,3780 B a	0,5542 A a	0,3256 B a	0,3922 A a	
		Concreto			Concreto	
13,10	0,3671 B b	0,3495 B c	0,5110 A c	0,3611 B b	0,4256 A b	
15,53	0,3703 B b	0,3501 C c	0,5207 A bc	0,3612 B b	0,4336 A b	
18,09	0,3721 B b	0,3617 B bc	0,5392 A b	0,3711 B ab	0,4350 A b	
20,66	0,4005 B a	0,3797 C ab	0,6173 A a	0,3851 B ab	0,5059 A b	
25,91	0,4022 B a	0,3998 B a	0,6303 A a	0,3891 B a	0,5127 A a	
		Aço Rugoso			Aço Rugoso	
13,10	0,4455 C b	0,4840 B b	0,5530 A e	0,4365 B b	0,4852 A d	
15,53	0,4620 C b	0,4985 B ab	0,5801 A d	0,4477 B b	0,5190 A c	
18,09	0,4660 C b	0,5003 B ab	0,6072 A c	0,4540 B b	0,5192 A c	
20,66	0,4998 B a	0,5101 B a	0,6625 A b	0,4904 B a	0,5985 A b	
25,91	0,5078 B a	0,5153 B a	0,6991 A a	0,5007 B a	0,6350 A a	

Para cada teste realizado, as médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem, estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Quadro 3 – Valores médios dos resultados dos ângulos de atrito com a parede dos grãos de café da variedade Catuaí-Vermelho determinados por diferentes equipamentos com distintos materiais de parede, em função do teor de umidade do produto

Teor de Umidade (% b.s.)	Equipamento					
	Jenike	Plano Inclinado	Arraste	Jenike	Arraste	
	Ângulo de Atrito Estático			Ângulo de Atrito Dinâmico		
		Alumínio			Alumínio	
11,98	8,74 C c	14,29 A c	11,09 B b	8,87 B c	10,09 A b	
14,82	9,06 C bc	14,86 A c	11,55 B b	8,73 B bc	10,43 A b	
17,72	9,37 C bc	15,92 A b	12,68 B a	9,17 B b	11,55 A a	
20,11	9,52 C b	16,57 A b	12,69 B a	9,34 B ab	11,77 A a	
22,82	10,25 C a	17,96 A a	13,00 B a	9,85 B a	12,31 A a	
		Polietileno			Polietileno	
11,98	12,67 C a	16,09 B b	17,37 A a	10,81 B a	12,21 A a	
14,82	12,69 C a	16,21 B ab	17,44 A a	10,90 B a	12,31 A a	
17,72	12,84 C a	16,31 B ab	17,53 A a	11,17 B a	12,71 A a	
20,11	12,88 C a	16,57 B a	17,54 A a	11,41 B a	12,75 A a	
22,82	12,89 C a	16,59 B a	17,85 A a	11,61 B a	12,83 A a	
		Aço Liso			Aço Liso	
11,98	12,58 C c	17,36 A d	16,11 B e	10,48 B c	13,27 A e	
14,82	12,81 C bc	18,51 A c	17,08 B d	10,54 B c	14,55 A d	
17,72	13,42 B abc	19,06 A bc	19,09 A c	12,47 B b	16,34 A c	
20,11	13,56 C ab	19,55 B d	20,78 A b	12,54 B b	18,41 A b	
22,82	13,96 C a	20,65 B a	23,74 A a	13,45 B a	20,97 A a	
		Madeira			Madeira	
11,98	16,93 C d	19,40 B c	22,85 A e	15,58 B d	20,00 A c	
14,82	17,17 C d	21,06 B b	24,09 A d	15,73 B d	20,69 A bc	
17,72	18,43 C c	21,51 B b	25,56 A c	17,78 B c	22,29 A b	
20,11	20,11 C a	22,82 B a	28,17 A b	19,37 B b	25,83 A a	
22,82	21,20 C a	23,22 B a	30,54 A a	20,52 B a	26,57 A a	
		Concreto			Concreto	
11,98	2,22 C b	23,23 B d	28,88 A d	21,54 B a	27,37 A d	
14,82	22,82 C ab	23,61 B cd	30,30 A c	21,99 B a	28,92 A c	
17,72	23,44 C ab	24,48 B c	31,27 A b	22,83 B a	29,75 A b	
20,11	24,16 C a	25,44 B b	31,76 A ab	23,54 B a	30,57 A ab	
22,82	24,26 C a	27,17 B a	32,08 A a	23,58 B a	30,70 A a	
		Aço Rugoso			Aço Rugoso	
11,98	24,33 C c	27,43 B b	31,73 A d	23,77 B b	30,36 A c	
14,82	24,97 C c	27,91 B ab	33,13 A c	24,42 B ab	31,05 A bc	
17,72	25,06 C bc	27,95 B ab	33,68 A c	24,49 B ab	31,96 A abc	
20,11	25,98 C ab	28,49 B a	34,74 A b	25,32 B a	32,14 A ab	
22,82	26,00 C a	28,84 B a	36,06 A a	25,34 B a	33,00 A a	

Para cada teste realizado, as médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem, estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Quadro 4 – Valores médios dos resultados dos ângulos de atrito com a parede dos grãos de café da variedade Conillon determinados por diferentes equipamentos com distintos materiais de parede, em função do teor de umidade do produto

Teor de Umidade (% b.s.)	Equipamento					
	Jenike	Plano Inclinado	Arraste	Jenike	Arraste	
	Ângulo de Atrito Estático			Ângulo de Atrito Dinâmico		
		Alumínio			Alumínio	
13,10	8,69 C c	13,41 A c	11,58 B d	8,39 B c	10,79 A c	
15,53	9,12 C bc	13,498 A c	12,80 B c	8,85 B bc	11,85 A b	
18,09	9,18 B bc	13,84 A bc	13,69 A b	8,91 B abc	12,40 A ab	
20,66	9,59 B ab	14,31 A b	14,50 A a	9,31 B ab	12,81 A a	
25,91	10,02 C a	15,52 A a	14,72 B a	9,73 B a	13,13 A a	
		Polietileno			Polietileno	
13,10	11,02 B a	13,32 A a	13,42 A a	1010 B a	10,92 A a	
15,53	11,04 B a	13,35 A a	13,42 A a	1012 B a	10,95 A a	
18,09	11,09 B a	13,35 A a	13,64 A a	10,14 B a	11,03 A a	
20,66	11,47 B a	13,60 A a	13,73 A a	10,17 B a	11,26 A a	
25,91	11,52 B a	14,00 A a	13,87 A a	10,30 B a	11,27 A a	
		Aço Liso			Aço Liso	
13,10	11,35 C c	13,13 B c	14,61 A e	10,01 B d	13,66 A d	
15,53	11,40 C c	13,80 B c	18,32 A d	10,78 B cd	15,66 A c	
18,09	12,41 C bc	13,97 B c	23,42 A c	11,53 B c	20,00 A b	
20,66	13,121 C b	17,94 B b	25,66 A b	12,78 B b	20,73 A b	
25,91	15,64 C a	21,31 B a	30,12 A a	14,18 B a	24,85 A a	
		Madeira			Madeira	
13,10	16,26 B c	17,07 B c	23,70 A d	15,56 B b	20,65 A a	
15,53	16,48 B bc	17,26 B c	24,19 A cd	15,92 B b	20,97 A a	
18,09	16,56 C bc	17,77 B c	24,85 A c	15,98 B b	21,04 A a	
20,66	17,47 C b	19,13 b b	26,28 A b	16,17 B b	21,20 A a	
25,91	21,39 B a	20,71 B a	29,00 A a	18,04 B a	21,42 A a	
		Concreto			Concreto	
13,10	20,16 B b	19,26 C c	27,07 A c	19,85 b b	23,06 A b	
15,53	20,32 B b	19,29 C c	27,50 A bc	19,86 B b	23,44 A b	
18,09	20,41 B b	19,88 B bc	28,34 A ab	20,36 B ab	23,51 A b	
20,66	21,82 B a	20,79 C b	31,69 A a	21,06 B a	26,83 A a	
25,91	21,91 B a	21,79 B a	32,22 A a	21,26 B a	27,14 A a	
		Aço Rugoso			Aço Rugoso	
13,10	24,01 C b	25,82 B b	28,94 A e	23,59 B b	25,87 A d	
15,53	24,80 C b	26,49 B ab	30,12 A d	24,12 B b	27,42 A c	
18,09	24,98 C b	26,58 B ab	31,26 A c	24,42 B b	27,43 A c	
20,66	26,55 B a	27,03 B a	33,52 A b	26,12 B a	30,90 A b	
25,91	26,92 B a	27,26 B a	34,96 A a	26,60 B a	32,41 A a	

Para cada teste realizado, as médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem, estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

(1978); SHEPHERD e BHARDWAJ (1986); DUTTA et al. (1988); BARYEH (2001) e NIMKAR e CHATTOPADHYAY (2001), que trabalharam com os seguintes produtos, respectivamente: *Vigna subterranea*; feijão-da-china; grãos-de-bico; castanhas-de-caju; grãos de café com pergaminho das espécies arábica e robusta, todos utilizando o método do “plano inclinado” para diferentes materiais de parede e teores de umidade dos produtos.

Além deste método, outro muito utilizado é o de arraste, sendo este modificado e melhorado por diversos pesquisadores ao longo dos anos. Trabalhando com os mais diferentes modelos de equipamentos de arraste, vários autores (BRUBAKER e POS, 1965; KALEEMULLAH, 1992; DALBELLO et al., 1994; CHANDRASEKAR e VISWANATHAN, 1999; JHA, 1999), para os mais diversos tipos de grãos e produtos (café arábica e robusta; *Euryale ferox*; amendoim e aveia-preta; amendoim; trigo e soja) concluíram que, tanto o coeficiente de atrito estático quanto o dinâmico, aumentaram com a elevação do teor de umidade, independente da superfície do material de parede empregado, resultado este semelhante ao encontrado para os testes realizados com o plano inclinado, concordando assim, com os resultados obtidos neste estudo. Além destes, outros equipamentos também foram utilizados para determinação dos coeficientes de atrito estático e dinâmico dos mais diversos produtos agrícolas, entre estes: *Corvulus avellana* L., milho, soja, aveia, trigo e cevada. Para todos os produtos observou-se um incremento dos coeficientes de atrito com o aumento do teor de umidade em todas as superfícies dos materiais de parede testados, de acordo com LAWTON, 1980; TSANG-MUI-CHUNG et al., 1984; GUMBE e MAINA, 1990; LIMA et al., 1997; LOCURTO et al., 1997; AYDIN, 2002. Observou-se, neste experimento, trabalhando com grãos de café com pergaminho, que os resultados determinados pelos diferentes equipamentos utilizados concordaram com a tendência apresentada pelos diversos autores acima citados independentemente do equipamento empregado.

Como pode ser observado, o comportamento dos resultados obtidos para ângulos e coeficientes de atrito estático e dinâmico dos grãos de café com pergaminho foi semelhante ao observado para a maioria dos produtos agrícolas, os quais apresentaram tendência de aumentar com o incremento do teor de umidade, independentemente da superfície do material de parede e do equipamento utilizado para as determinações, fato também verificado e comprovado para as propriedades dos grãos de café com pergaminho, determinadas pelo equipamento de Jenike. Este

aumento nas propriedades de atrito (coeficiente e ângulo), em função do teor de umidade deve-se, possivelmente, ao fato de que os produtos com maior teor de umidade geram maiores forças de adesão e coesão entre os grãos e também, entre estes e a superfície de contato. Além disso, em muitos produtos, vários autores citam que o aumento do teor de umidade foi responsável pelo aumento da rugosidade superficial do mesmo (LAWTON, 1980; TSANG-MUI-CHUNG et al., 1984; GUMBE e MAINA, 1990; KALLEMULLAH, 1992; JOSHI et al., 1993; VISWANATHAN et al., 1996; SINGH e GOSWANI, 1996; JHA, 1999; BARYEH, 2001; BALASUBRAMANIAN, 2001; NIMKAR, 2001; IRTWANGE e IGBEKA, 2002), dificultando, assim, o deslizamento do produto e, conseqüentemente, aumentando as forças de atrito presentes.

De acordo com Sherwood, citado por MOHSENIN (1970), a força de atrito pode ser considerada como sendo composta por duas componentes principais; uma força é necessária para deformar e cisalhar as “asperezas” das superfícies em contato e outra para superar a adesão ou coesão entre as superfícies.

Segundo BRUBAKER e POS (1965) e FRASER et al. (1978), a utilização do plano inclinado para determinação do coeficiente e ângulo de atrito estático apresenta resultados inconsistentes. Os autores sugerem, para determinação desta importante propriedade, o uso de equipamentos e métodos de medida mais precisos. O método vem sendo utilizado em larga escala nos últimos anos para a determinação deste coeficiente, para os mais diversos produtos. Nos Quadros 1 a 4 são apresentadas as comparações entre os resultados obtidos dos ângulos e coeficientes de atrito estático e dinâmico dos grãos de café das duas variedades. Os resultados foram determinados pelo equipamento de cisalhamento de Jenike, pelo plano inclinado e de arraste.

Observa-se, nos Quadros 1 a 4, que, em praticamente todos os materiais de parede e teores de umidade, os resultados do coeficiente e o do ângulo de atrito estático dos grãos de café das variedades Catuaí-Vermelho e Conillon, determinados pelo equipamento de cisalhamento de Jenike, foram estatisticamente inferiores aos obtidos pelos métodos do plano inclinado e de arraste. Assim, os resultados obtidos por estes equipamentos considerados alternativos superestimaram os determinados pelo de Jenike, o que se deve, ao fato de que, apesar destes equipamentos serem de fácil construção e operação, apresentam, por suas próprias características, fontes de erros, principalmente, por não terem sido projetados para determinação destas propriedades, sofrendo inúmeras adaptações ao longo dos anos, fato que já não

ocorre com o equipamento que foi desenvolvido por Jenike, que desenvolveu uma metodologia e um aparelho de cisalhamento apropriado para determinação das propriedades dos produtos armazenados.

Os resultados obtidos no plano inclinado superestimaram os coeficientes e ângulos de atrito estático possivelmente devido a sua própria operação, na qual inúmeros fatores podem acarretar em erros nas determinações, principalmente pelo fato de este equipamento ser totalmente manual, onde erros na operação podem ocorrer com frequência, por mais treinado que o operador seja.

Já para o equipamento de arraste em conjugação com a máquina universal de teste, os resultados superestimaram os coeficientes, possivelmente, porque o mecanismo que o mesmo utiliza não é completamente isento de atrito, o que pode ter aumentando a força de atrito a ser vencida para permitir o deslocamento do produto.

Pode-se também observar que os coeficientes e ângulos de atrito dinâmico determinados pelo equipamento experimental de arraste superestimaram os resultados obtidos pelo equipamento de Jenike em praticamente todos os materiais de parede, sendo sempre superiores estatisticamente; exceção feita à superfície de alumínio, onde os resultados do plano inclinado foram estatisticamente superiores aos dos equipamentos de arraste e Jenike, para todas as características físicas estudadas.

Com relação aos valores numéricos médios, as diferenças proporcionadas pelos equipamentos, ou seja, entre o equipamento de Jenike (padrão) e os demais, podem chegar a aproximadamente 72, 42, 80 e 62% para os coeficientes de atrito estático e dinâmico, das variedades Catuaí-Vermelho e Conillon, respectivamente. Já para os ângulos de atrito estático e dinâmico das variedades Catuaí-Vermelho e Conillon estas diferenças chegaram, respectivamente, a 67, 40, 73 e 58%.

Os coeficientes das equações ajustadas, acompanhados dos respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e erro médio relativo (P), encontram-se nos Quadros 5 e 6.

Nas Figuras 15 a 18 são apresentadas as médias dos valores experimentais e estimados dos coeficientes e ângulos de atrito estático e dinâmico dos grãos de café com pergaminho das duas espécies em distintos materiais de parede, em função do teor de umidade do produto.

Quadro 5 – Coeficientes das equações ajustadas para se calcular as propriedades físicas dos grãos de café com pergaminho da variedade Catuaí-Vermelho em distintos materiais de parede, em função do teor de umidade do produto, determinados pelo equipamento de cisalhamento de Jenike, com os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e erro médio relativo (P)

Material de Parede	Coeficientes de Regressão		$R^2$	P
	$\beta_0$	$\beta$		
Coeficiente de Atrito Estático (adimensional)				
Alumínio	0,1251	0,2299x10 <sup>-2</sup> *	0,9370	0,0108
Polietileno <sup>+</sup>		0,2271		
Aço Liso	0,1937	0,2405x10 <sup>-2</sup> *	0,9767	0,0049
Madeira	0,1959	0,8247x10 <sup>-2</sup> *	0,9445	0,0220
Concreto <sup>+</sup>		0,4325		
Aço Rugoso	0,4123	0,3422x10 <sup>-2</sup> *	0,9142	0,0074
Coeficiente de Atrito Dinâmico (adimensional)				
Alumínio	0,1213	0,2233x10 <sup>-2</sup> *	0,9819	0,0066
Polietileno <sup>+</sup>		0,1976		
Aço Liso	0,1165	0,5387x10 <sup>-2</sup> *	0,9096	0,0399
Madeira	0,1531	0,9625x10 <sup>-2</sup> *	0,9513	0,0230
Concreto <sup>+</sup>		0,4184		
Aço Rugoso	0,4041	0,3156x10 <sup>-2</sup> *	0,9136	0,0074
Ângulo de Atrito Estático (°)				
Alumínio	7,1495	0,1278 *	0,9369	0,0105
Polietileno <sup>+</sup>		12,79		
Aço Liso	10,9793	0,1309 *	0,9769	0,0047
Madeira	11,3864	0,4221 *	0,9455	0,0201
Concreto	19,8605	0,2013 *	0,9642	0,0045
Aço Rugoso	22,4662	0,1604 **	0,9138	0,0065
Ângulo de Atrito Dinâmico (°)				
Alumínio	6,9258	0,1250 *	0,9824	0,0064
Polietileno <sup>+</sup>		11,07		
Aço Liso	6,7258	0,2956 *	0,9086	0,0266
Madeira	9,0871	0,4979 *	0,9512	0,0211
Concreto <sup>+</sup>		22,70		
Aço Rugoso	22,0597	0,1491 *	0,9117	0,0066

\* Significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste T.

\*\* Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste T.

<sup>+</sup> Não-significativo, valor médio.

Quadro 6 – Coeficientes das equações ajustadas para se calcular as propriedades físicas dos grãos de café com pergaminho da variedade Conillon em distintos materiais de parede, em função do teor de umidade do produto, determinados pelo equipamento de cisalhamento de Jenike, com os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e erro médio relativo (P)

Material de Parede	Coeficientes de Regressão		$R^2$	P
	$\beta_0$	$\beta$		
Coeficiente de Atrito Estático (adimensional)				
Alumínio	0,1303	0,1809x10 <sup>-2*</sup>	0,9702	0,0078
Polietileno <sup>+</sup>		0,1986		
Aço Liso	0,1076	0,6404x10 <sup>-2*</sup>	0,9488	0,0282
Madeira	0,1737	0,7750x10 <sup>-2**</sup>	0,8307	0,0443
Concreto	0,3234	0,3162x10 <sup>-2**</sup>	0,8087	0,0144
Aço Rugoso	0,3812	0,5095x10 <sup>-2*</sup>	0,9036	0,0125
Coeficiente de Atrito Dinâmico (adimensional)				
Alumínio	0,1256	0,1792x10 <sup>-2*</sup>	0,9643	0,0090
Polietileno <sup>+</sup>		0,1793		
Aço Liso	0,0965	0,6087x10 <sup>-2*</sup>	0,9916	0,0087
Madeira	0,2281	0,3485x10 <sup>-2**</sup>	0,8498	0,0202
Concreto	0,3267	0,2511x10 <sup>-2*</sup>	0,8938	0,0086
Aço Rugoso	0,3648	0,5415x10 <sup>-2*</sup>	0,909	0,0121
Ângulo de Atrito Estático (°)				
Alumínio	7,4438	0,1004*	0,9711	0,0077
Polietileno <sup>+</sup>		11,23		
Aço Liso	6,3184	0,3465*	0,9493	0,0269
Madeira	10,2064	0,3980**	0,8342	0,0406
Concreto	17,9853	0,1575**	0,8103	0,0131
Aço Rugoso	21,0232	0,2374*	0,9032	0,0110
Ângulo de Atrito Dinâmico (°)				
Alumínio	7,1677	0,1003*	0,9628	0,0091
Polietileno <sup>+</sup>		10,16		
Aço Liso	5,6401	0,3331*	0,9914	0,0084
Madeira	12,9152	0,1831**	0,8520	0,0189
Concreto	18,1215	0,1263*	0,8945	0,0078
Aço Rugoso	20,2231	0,2543*	0,9099	0,0105

\* Significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste T.

\*\* Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste T.

+ Não-significativo, valor médio.

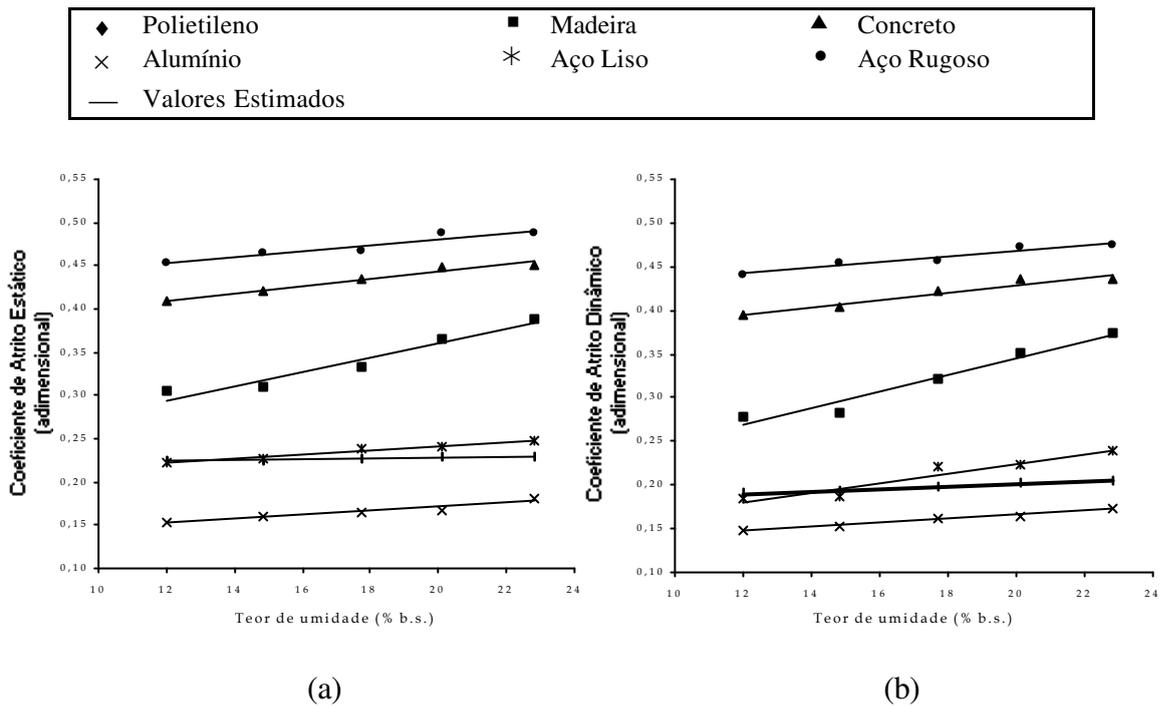


Figura 15 – Valores experimentais e estimados dos coeficientes de atrito estático (a) e dinâmico (b) da variedade Catuaí-Vermelho determinados pelo equipamento de Jenike, em distintos materiais de parede, em função do teor de umidade do produto.

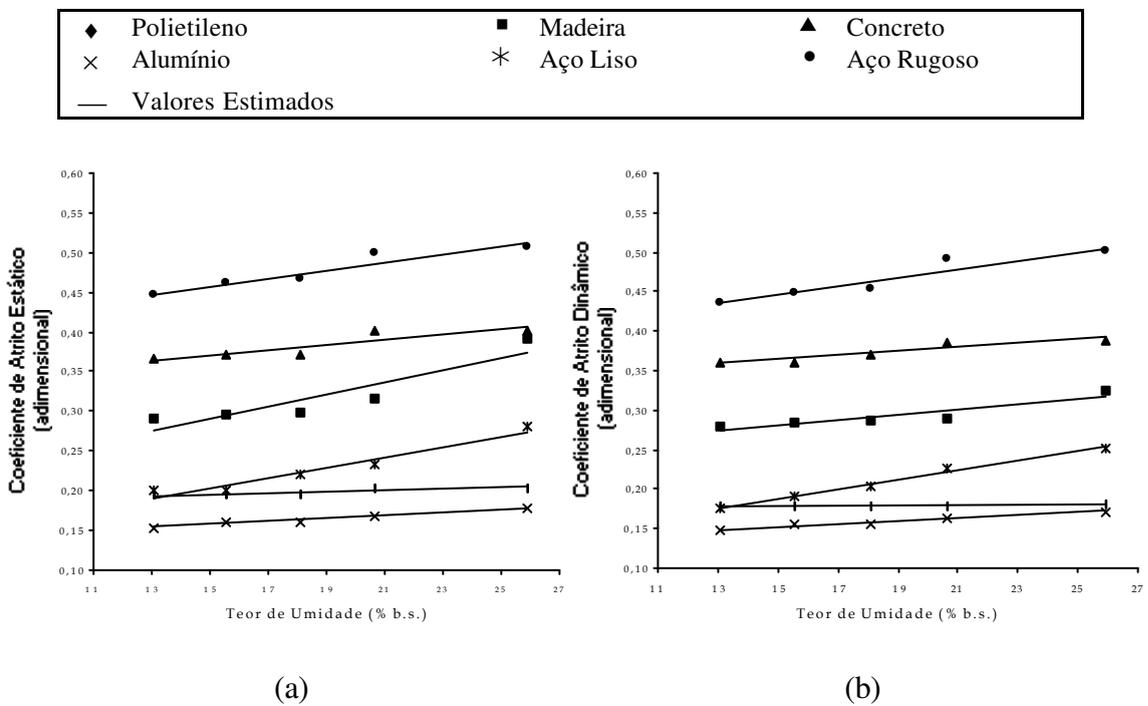


Figura 16 – Valores experimentais e estimados dos coeficientes de atrito estático (a) e dinâmico (b) da variedade Conillon determinados pelo equipamento de Jenike, em distintos materiais de parede, em função do teor de umidade do produto.

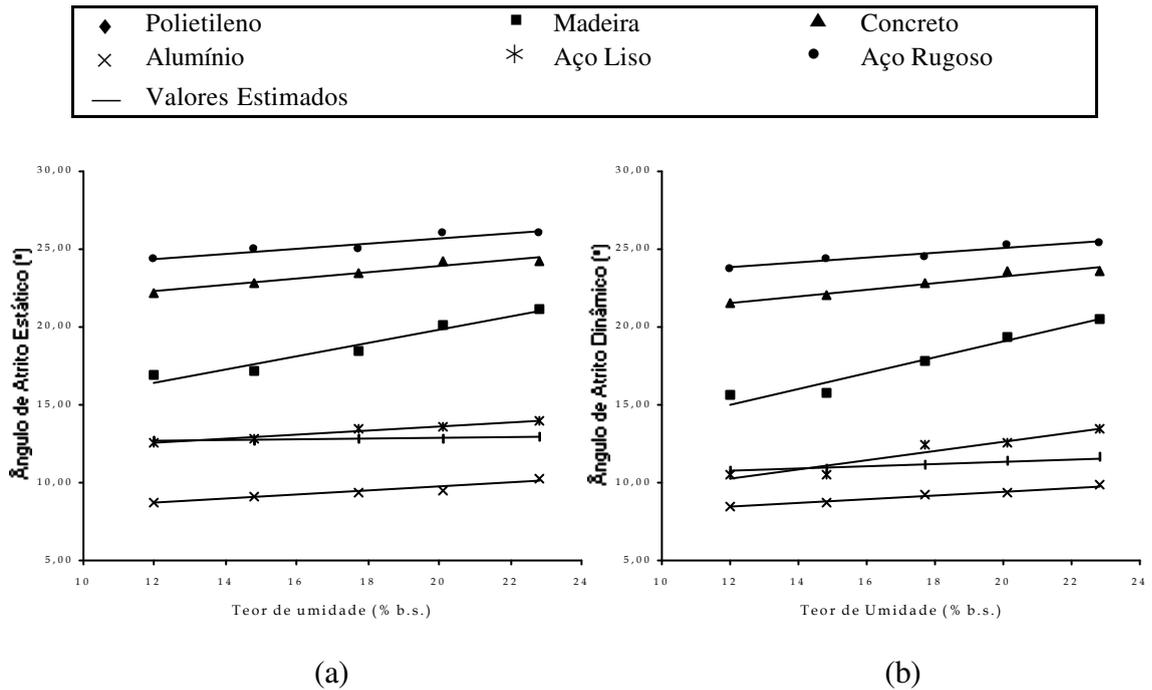


Figura 17 – Valores experimentais e estimados dos ângulos de atrito estático (a) e dinâmico (b) da variedade Catuaí-Vermelho, determinado pelo equipamento de Jenike, em distintos materiais de parede, em função do teor de umidade do produto.

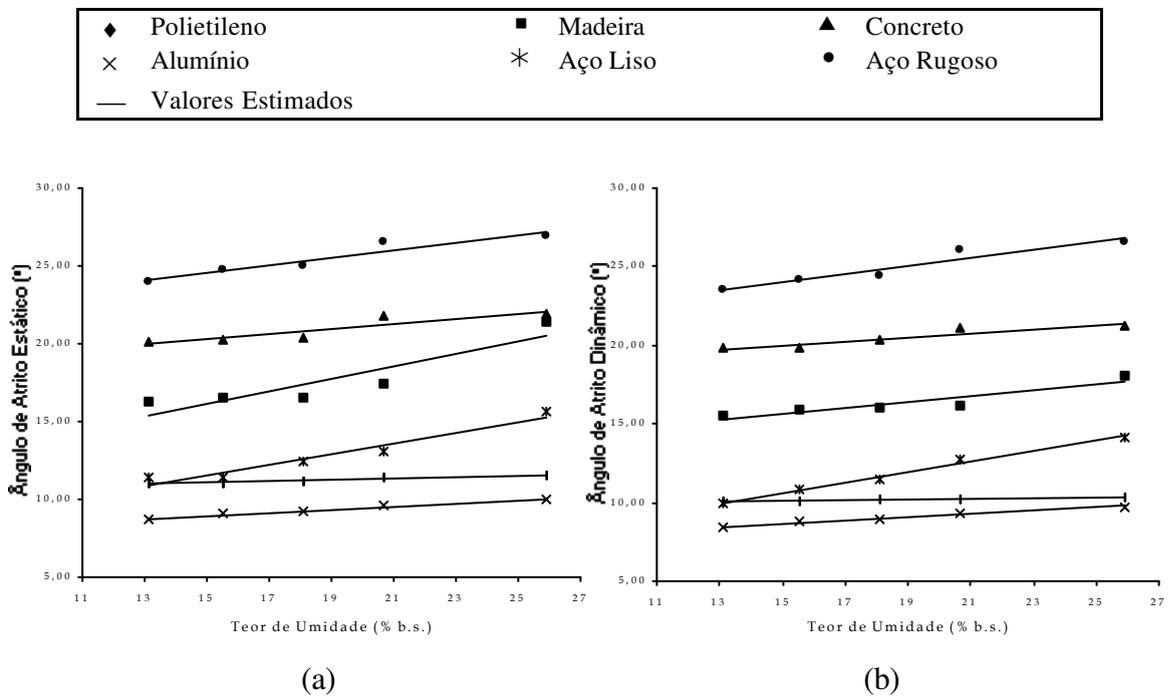


Figura 18 – Valores experimentais e estimados dos ângulos de atrito estático (a) e dinâmico (b) da variedade Conillon determinados pelo equipamento de Jenike, em distintos materiais de parede, em função do teor de umidade do produto.

Observa-se, nas Figuras 15 a 18, a existência de correlação positiva entre os valores dos coeficientes e ângulos de atrito estático e dinâmico determinados pelo equipamento de cisalhamento de Jenike para ambas variedades dos grãos de café e o teor de umidade, ou seja, a redução dos valores de umidade durante o processo de secagem do café provoca a diminuição dos parâmetros estudados do produto, em praticamente todos os materiais de parede. Estas características físicas aumentam linearmente com o aumento do teor de umidade, sendo esta tendência também verificada por diversos autores para vários produtos agrícolas (JOSHI et al., 1993; VISVANATHAN et al., 1996; SUTHAR e DAS, 1996; SINGH e GOSWAMI, 1996; ÇARMAN, 1996; GUPTA e DAS, 1997; GUPTA e DAS, 1998; AVIARA et al., 1999; OLAOYE, 2000; BALASUBRAMANIAN, 2001; BARYEH, 2002; IRTWANGE e IGBEKA, 2002). Outros autores, em número bem mais reduzido, também apresentam outras relações (polinômio de 2<sup>o</sup> grau e exponencial) entre estas propriedades físicas de atrito e o teor de umidade (AYDIN, 2002; KALEEMULLAH e GUNASEKAR, 2002; JHA, 1998; LIMA et al., 1997; BENEDETTI, 1987).

Observa-se, nos Quadros 5 e 6, que, para o polietileno, não existe correlação entre as características físicas dos grãos de café de ambas espécies e o teor de umidade dos grãos. O mesmo ocorre para superfície de concreto somente na variedade Catuaí-Vermelho.

Pode-se verificar, nas Figuras 15 a 18, que, para ambas variedades de café os coeficientes e ângulos de atrito estático e dinâmico são mais sensivelmente influenciados pela superfície do material de parede do que pelo teor de umidade, fato este também verificado por outros autores para diferentes produtos agrícolas (LAWTON, 1980; GUPTA e DAS, 1997; NASCIMENTO et al., 2001; AYDIN, 2002; NASCIMENTO et al., 2002). De acordo com Sherwood, citado por MOHSENIN (1970), a força de atrito como já comentada anteriormente, pode ser considerada como sendo composta por dois componentes principais, uma força necessária para deformar e cisalhar as “asperezas” das superfícies em contato e uma outra força necessária para superar a adesão ou coesão entre as superfícies. Neste caso, a maior influência da superfície sobre as propriedades de atrito (ângulos e coeficientes) deve-se, possivelmente, ao fato da força requerida para vencer as “asperezas” ou rugosidades ser maior que aquela necessária para superar as forças de adesão e, ou, coesão.

No Quadro 7, observam-se as diferentes rugosidades das superfícies dos materiais de parede empregados nos testes. As superfícies, por mais homogêneas, apresentam irregularidades, conhecidas como rugosidade, que são o conjunto de pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. Para efeito comparativo, determinou-se a rugosidade de uma placa de vidro cuja superfície é tida como uma das de menor rugosidade.

Quadro 7 – Rugosidade média, em  $\mu\text{m}$ , e respectivo desvio-padrão das superfícies dos materiais de parede utilizados

Material de Parede						
Vidro	Alumínio	Polietileno	Aço Liso	Madeira	Concreto	Aço Rugoso
0,02 (0,00)	0,30 (0,05)	0,52 (0,07)	0,64 (0,03)	3,56 (0,09)	3,98 (0,32)	4,89 (0,75)

Nas Figuras 15 a 18 e no Quadro 5, observa-se que o aumento da rugosidade, ou seja, da mudança do tipo de material de parede, com a maior rugosidade, tanto o coeficiente de atrito estático como o dinâmico e seus respectivos ângulos de atrito aumentam, sendo maiores para os materiais que apresentaram as rugosidades médias mais elevadas, para praticamente todos os teores de umidade e para as duas variedades.

Estas diferenças nas propriedades físicas, devido às diferentes superfícies dos materiais de parede, também foram atribuídas por outros autores ao fato de que as superfícies mais lisas, ou seja, menos rugosas e ásperas, proporcionam menor resistência ou atrito ao deslocamento e, conseqüentemente, menores coeficientes e ângulos de atrito (BICKERT e BUELOW, 1966; SNYDER et al., 1967; LAWTON, 1980; TSANG-MUI-CHUNG et al., 1984; KALEEMULLAH, 1992; JOSHI et al., 1993; SINGH e GOSWAMI, 1996; GUPTA e DAS, 1998; JHA, 1998; BALASUBRAMANIAN, 2001; BARYEH, 2001).

No caso do coeficiente de atrito estático da variedade Catuaí-Vermelho, as maiores variações ocasionadas pelo efeito do teor de umidade foram de, aproximadamente, 27%. Devido aos diferentes materiais de parede, esta variação chegou a, aproximadamente, 200%, observada entre as superfícies de menor e maior rugosidade média. Para o coeficiente de atrito dinâmico desta mesma variedade, a diferença máxima devido ao teor de umidade foi de, aproximadamente, 34%,

enquanto a proporcionada pelas diferentes superfícies dos materiais de parede foi de até 195%. Já para a variedade Conillon, a diferença observada para o coeficiente de atrito estático em virtude da variação do teor de umidade foi de, aproximadamente, 40%, e devido à rugosidade média, foi de 190%. Para o coeficiente de atrito dinâmico para esta variedade, a maior diferença proporcionada pelo teor de umidade foi de 43% e 195% para a rugosidade média. Para o ângulo de atrito estático da variedade Catuaí-Vermelho, foi observada uma variação devido à rugosidade de, aproximadamente, 180%, enquanto para a diferença proporcionada pelo teor de umidade, de 25%. Para o dinâmico, estas diferenças foram, respectivamente, de 170% e 32%. Para a variedade Conillon, a umidade foi responsável por uma variação de até 38% e a rugosidade de 180% para o ângulo de atrito estático, já para o dinâmico estas diferenças foram de 42% e 180%, respectivamente. Com estas variações, pode-se verificar e comprovar que, nas condições em que este trabalho foi realizado, as propriedades dos grãos de café com pergaminho são muito mais influenciadas pela superfície do material do que pela umidade. As maiores propriedades foram obtidas na superfície do material aço rugoso seguido, em ordem decrescente, pelo concreto, madeira, aço lido, polietileno e alumínio, sendo esta ordem observada para ambas variedades e em praticamente todos os teores de umidade utilizados nos testes.

Nos Quadros 8 e 9 são apresentados os limites superior e inferior e o intervalo de confiança dos coeficientes e ângulos de atrito estático e dinâmico dos grãos de café com pergaminho das variedades Catuaí-Vermelho e Conillon, nos diferentes materiais de parede.

De acordo com CALIL JÚNIOR (1990), NASCIMENTO (1996) e CALIL JÚNIOR et al. (1997), as propriedades físicas e de fluxo devem ser apresentadas com seus limites superior e inferior para que os projetistas possam utilizar o método dos estados limites, objetivando a realização de projetos estruturais mais seguros e econômicos, de acordo com a atual tendência mundial. Os limites superiores são tomados para o projeto de fluxo e os inferiores para o projeto de ações (pressões) e são apresentados, para diversos produtos, por vários autores (OJE e UGBOR, 1991; BARRÊTO, 1997; CALIL JÚNIOR et al., 1997; OLAJIDE e ADE-OMOWAYE, 1999; NASCIMENTO et al., 2002a; NASCIMENTO et al., 2002b).

Quadro 8 – Limites superior e inferior e intervalo de confiança dos ângulos e coeficientes de atrito estático e dinâmico dos grãos de café com pergaminho da variedade Catuaí-Vermelho, determinados pelo equipamento de cisalhamento de Jenike na faixa de umidade de 11,98 a 22,82 % b.s.

Material de Parede	Limites Determinados Experimentalmente		Limites Determinados pelo Intervalo de Confiança (95%)			
	Inferior	Superior	Inferior		Superior	
Coeficiente de Atrito Estático						
Alumínio	0,1504	0,1825	0,1461	0,1613	0,1758	0,1856
Polietileno	0,2189	0,2307	0,2093	0,2404	0,2239	0,2336
Aço Liso	0,2118	0,2514	0,1986	0,2478	0,2415	0,2556
Madeira	0,2993	0,3925	0,2878	0,3212	0,3763	0,3994
Concreto	0,3979	0,4514	0,3706	0,4466	0,4490	0,4524
Aço Rugoso	0,4493	0,4913	0,4442	0,4603	0,4709	0,5048
Coeficiente de Atrito Dinâmico						
Alumínio	0,1468	0,1754	0,1440	0,1538	0,1685	0,1786
Polietileno	0,1814	0,2086	0,1699	0,2119	0,1973	0,2135
Aço Liso	0,1821	0,2418	0,1756	0,1944	0,2314	0,2469
Madeira	0,2746	0,3782	0,2634	0,2945	0,3648	0,3836
Concreto	0,3821	0,4407	0,3537	0,4360	0,4257	0,4471
Aço Rugoso	0,4350	0,4764	0,4278	0,4529	0,4654	0,4817
Ângulo de Atrito Estático						
Alumínio	8,55	10,34	8,31	9,16	9,98	10,51
Polietileno	12,35	12,99	11,83	13,52	12,63	13,15
Aço Liso	11,96	14,11	11,24	13,92	13,57	14,34
Madeira	16,66	21,43	16,06	17,81	20,63	21,77
Concreto	21,70	24,29	20,36	24,08	24,18	24,33
Aço Rugoso	24,19	26,30	23,95	24,72	25,22	26,79
Ângulo de Atrito Dinâmico						
Alumínio	8,35	9,95	8,19	8,75	9,57	10,13
Polietileno	10,28	11,78	9,65	11,97	11,17	12,04
Aço Liso	10,32	13,59	9,95	11,01	13,03	13,87
Madeira	15,35	20,72	14,75	16,42	20,04	20,99
Concreto	20,91	23,78	19,51	23,58	23,07	24,09
Aço Rugoso	23,51	25,47	23,17	24,37	24,96	25,72

Quadro 9 – Limites superior e inferior e intervalo de confiança dos ângulos e coeficientes de atrito estático e dinâmico dos grãos de café com pergaminho da variedade Conillon, determinados pelo equipamento de cisalhamento de Jenike na faixa de umidade de 13,10 a 25,91 % b.s.

Material de Parede	Limites Determinados Experimentalmente		Limites Determinados pelo Intervalo de Confiança (95%)			
	Inferior	Superior	Inferior		Superior	
Coeficiente de Atrito Estático						
Alumínio	0,1464	0,1864	0,1390	0,1667	0,1560	0,1975
Polietileno	0,1939	0,2057	0,1929	0,1965	0,1967	0,2107
Aço Liso	0,1921	0,2818	0,1809	0,2208	0,2755	0,2845
Madeira	0,2882	0,3989	0,2831	0,3000	0,3735	0,4098
Concreto	0,3625	0,4079	0,3571	0,3772	0,3891	0,4153
Aço Rugoso	0,4429	0,5093	0,4399	0,4511	0,5047	0,5110
Coeficiente de Atrito Dinâmico						
Alumínio	0,1411	0,1793	0,1337	0,1614	0,1543	0,1886
Polietileno	0,1743	0,1882	0,1692	0,1871	0,1669	0,1966
Aço Liso	0,1725	0,2568	0,1677	0,1852	0,2415	0,2637
Madeira	0,2739	0,3293	0,2677	0,2892	0,3163	0,3349
Concreto	0,3557	0,3919	0,3455	0,3767	0,3827	0,3955
Aço Rugoso	0,4339	0,5021	0,4298	0,4432	0,4977	0,5037
Ângulo de Atrito Estático						
Alumínio	8,33	10,56	7,91	9,47	8,87	11,18
Polietileno	10,97	11,62	10,91	11,12	11,13	11,90
Aço Liso	10,87	15,74	10,25	12,45	15,40	15,88
Madeira	16,08	21,75	15,81	16,70	20,48	22,30
Concreto	19,93	22,19	19,66	20,66	21,27	22,55
Aço Rugoso	23,89	26,99	23,75	24,28	26,78	27,07
Ângulo de Atrito Dinâmico						
Alumínio	8,03	10,17	7,61	9,17	8,77	10,69
Polietileno	9,89	10,66	9,61	10,59	9,47	11,13
Aço Liso	9,79	14,40	9,52	10,50	13,58	14,78
Madeira	15,32	18,23	14,99	16,12	17,55	18,52
Concreto	19,58	21,40	19,07	20,64	20,95	21,58
Aço Rugoso	23,46	26,66	23,26	23,91	26,47	26,73

Para o caso dos grãos de café com pergaminho, independentemente do material de parede e da espécie de café, o limite inferior foi obtido no menor e o superior no maior teor de umidade, para ambos coeficientes e ângulos. Pode-se observar que, tanto os dois limites apresentados nos Quadros 8 e 9 quanto os valores das médias visualizadas nos Quadros 1 e 2, são influenciados pelo tipo de material de parede, visto que, as superfícies que apresentaram as maiores rugosidades médias também proporcionaram numericamente os maiores limites, tanto para o inferior como para o superior. O intervalo de confiança de 95%, determinado estatisticamente, foi concebido também com a média do menor e do maior teor de umidade, visto que os limites desejados encontravam-se nestes teores de umidade, para cada material de parede e cada variedade.

Tratando-se especificamente de grãos de café, os resultados deste experimento, com relação às médias, são semelhantes aos encontrados por CHANDRASEKAR e VISWANATHAN (1999), GHOSH (1968) e ESCHENWALD e HALL (1961), sendo que os dois primeiros trabalharam com grãos das espécies arábica e robusta, sendo estes providos de pergaminhos e seus coeficientes determinados em função do teor de umidade, enquanto o terceiro trabalhou com diferentes modos de preparos do café. A comparação dos resultados torna-se difícil, considerando as diferentes condições nas quais os trabalhos experimentais foram conduzidos. CHANDRASEKAR e VISWANATHAN (1999) utilizaram para as determinações um equipamento de arraste, uma variedade arábica e outra robusta, em quatro diferentes superfícies. Como resultado, observaram que o coeficiente de atrito aumenta linearmente com o aumento do teor de umidade, sendo o atrito gerado nos grãos da espécie robusta menor que o da arábica para todas as superfícies testadas. Estes coeficientes foram numericamente semelhantes aos encontrados pelo equipamento de cisalhamento de Jenike neste experimento. Os coeficientes de atrito estático foram determinados em vários materiais de parede por GHOSH (1968), utilizando grãos com pergaminho das duas principais espécies de café com diferentes teores de umidade, pela utilização de um plano inclinado. Os resultados foram um pouco superiores aos encontrados neste experimento, tanto para a espécie arábica quanto para a robusta, que segundo o autor, não apresentaram diferenças marcantes entre elas. ESCHENWALD e HALL (1961) trabalharam com um plano inclinado para determinação dos coeficientes de atrito estático dos grãos de café de uma variedade da espécie arábica com diferentes formas de preparo em

diversos materiais de parede e seus resultados foram bem superiores aos encontrados por JOSHI (1968) e também por este estudo, que utilizou o equipamento de Jenike.

## 4.2. Atrito interno

### 4.2.1. Ângulos de repouso, atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno

No Quadro 10 são apresentados os valores médios com os respectivos desvios-padrão (DP) das propriedades físicas: ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ) e efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ), determinados pelo equipamento de cisalhamento de Jenike, e o ângulo de repouso ( $\theta$ ) dos grãos de café das variedades Catuaí-Vermelho e Conillon para diferentes teores de umidade.

Quadro 10 – Valores médios das propriedades físicas instantâneas de atrito interno e ângulo de repouso dos grãos de café das espécies arábica e robusta, em função do teor de umidade

Teor de Umidade (% b.s.)	Ângulo de Atrito				Ângulo de Repouso	
	Interno		Efetivo		(°)	DP
	(°)	DP	(°)	DP		
Catuaí-Vermelho						
11,98	35,45 B c	1,44	38,82 A c	1,52	34,14 B b	0,51
14,82	37,55 B b	2,15	40,23 A b	1,33	34,84 C ab	0,40
17,72	37,59 B b	1,97	40,69 A b	1,24	35,16 C a	0,33
20,11	38,91 B a	1,73	42,16 A a	0,77	35,32 C a	0,31
22,82	39,08 B a	1,65	42,59 A a	1,05	35,45 C a	0,54
Conillon						
13,10	32,32 B c	0,65	33,87 A c	1,18	31,36 B c	0,67
15,53	32,71 B bc	0,81	35,24 A bc	1,20	31,59 B c	0,16
18,09	33,68 B ab	0,84	35,85 A b	1,08	31,65 C bc	0,49
20,66	34,25 B a	0,77	36,53 A b	1,25	32,39 C ab	0,31
25,91	34,46 B a	0,72	37,78 A a	0,43	32,86 C a	0,24

DP = Desvio-padrão.

Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, não diferem, estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Como já comentado anteriormente, as propriedades físicas dos produtos agrícolas variam de acordo com a mudança do seu teor de umidade (MOHSENIN, 1970), e isto pode ser verificado no Quadro 10 para as propriedades instantâneas dos grãos de café das duas variedades, pois, se observa, com os resultados obtidos e apresentados, que existe tendência de acréscimo dos valores dos ângulos de atrito, de repouso e do efetivo ângulo de atrito interno com o aumento do teor de umidade, em ambas variedades avaliadas nas análises. Este resultado concorda com SILVA e CORRÊA (2000), que afirmaram ser o ângulo de repouso altamente influenciado pelo teor de umidade do produto, confirmado tal afirmação através da apresentação de resultados de pesquisas com vários produtos, entre eles, trigo, cevada e milho.

Concordando com os resultados obtidos neste experimento, vários autores, trabalhando com os mais diversos tipos de produtos, observaram esta tendência de aumento do ângulo de repouso com a elevação do teor de umidade da massa de grãos, dentre eles: BARYEH (2001); JHA (1999); DALBELLO et al. (1994); KALEEMULLAH (1992); SHEPHERD e BHARDWAJ (1986); FRASER et al. (1978), os quais trabalharam com os seguintes produtos, respectivamente: *Vigna subterranea*; amendoim e aveia-preta; amendoim; castanha-de-caju e *Vicia faba L.*

Este aumento do ângulo de repouso de ambas variedades com o incremento do teor de umidade se deve, possivelmente, ao fato de que produtos com maior teor de umidade apresentam uma maior força de coesão entre as partículas ou componentes individuais que compõem a massa, tendendo a agregar estas partículas e, conseqüentemente, aumentando o atrito interno. Outro fator sugerido por diversos autores é o de que, com um maior teor de umidade, certos produtos aumentam a rugosidade de sua superfície, impondo, assim, uma maior resistência ao deslizamento de uma partícula da massa de produto contra a outra, conseqüentemente, aumentando o ângulo de repouso do material (MOHSENIN, 1970; KALEEMULLAH, 1992; JOSHI, 1993; SINGH e GOSWAMI, 1996; GUPTA e DAS, 1997; JHA, 1999; BARYEH, 2001).

Para o ângulo de atrito interno e para o efetivo ângulo de atrito interno dos grãos de café de ambas variedades, observa-se, no Quadro 10, a mesma tendência verificada para o ângulo de repouso, ou seja, o aumento dos ângulos com o incremento do teor de umidade, fato este comprovado para outros produtos em pesquisas anteriores.

KAMATH et al. (1994), trabalhando com farinha de trigo, com três teores de umidade variando de 11,8 a 16,4% b.s., concluíram que o aumento do teor de umidade provocou incremento do ângulo de atrito interno deste material, sendo este resultado semelhante ao encontrado por LIMA et al. (1997) trabalhando com grãos de milho com teor de umidade variando de 9 a 20% b.s. que, por sua vez, são semelhantes aos resultados encontrados por DUFFY e PURI (1999), para sementes de soja, algodão e milho, com teores de umidade variando de 8,3 a 12,8 % b.u. Já ZOU e BRUSEWITZ (2001), trabalhando com pétalas de calêndula moídas, com dois teores de umidade (12 e 21% b.s.) e duas granulometrias, verificaram que, para as partículas de menor tamanho, o ângulo de atrito interno aumentou com o acréscimo de umidade, mas diminuíram para as partículas de maior tamanho.

Trabalhando com diversos tipos de feijão e teores de umidade, NASCIMENTO et al. (2001b, 2002a, 2002b), verificaram que, para o feijão “macassar”, o aumento do teor de umidade de 12 para 18% b.u. gerou um incremento muito pequeno nos limites superior e inferior do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno, resultado semelhante ao encontrado para grãos de feijão-mulatinho nos teores de umidade de 18 e 20% b.u. Para grãos de feijão “sempre-verde”, com três teores de umidade (12, 16 e 18% b.u.), observaram que, para os dois primeiros teores de umidade, não houve diferença entre o limite superior e inferior dos ângulos de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno, mas estes aumentaram para o teor de umidade de 18% b.u. Determinando o limite superior e inferior do efetivo ângulo de atrito interno e do ângulo de atrito interno do feijão preto com três teores de umidade (14, 20 e 25% b.u.), verificaram que estes limites aumentaram com o aumento do teor de umidade de 14 para 20%, mas diminuíram com o incremento de 20 para 25%.

A tendência verificada acima concorda parcialmente com os resultados deste experimento, ou seja, o aumento do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno com o aumento do teor de umidade deve-se, possivelmente, às mesmas razões já mencionadas para o ângulo de repouso.

Contrariando esta tendência, BARRÊTO (1997), trabalhando com grãos de urucum em três teores de umidade (9, 10 e 11% b.u.), verificou um decréscimo do ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno com o aumento do teor de umidade, sendo este resultado semelhante ao encontrado por ZOU e BRUSEWITZ (2001), para pétalas de calêndula moídas com maior granulometria, e por DUFFY e

PURI (1996), para açúcar de confeitaria e detergente em pó em dois teores de umidade, respectivamente, de 1,4 e 4,4% b.s. e 0,3 e 3,3% b.s. Segundo estes autores, este comportamento deve-se, possivelmente, ao fato de que, para teores de umidade mais elevados, principalmente para pós, ocorre a formação de uma camada superficial que atua como um lubrificante durante a aplicação da força de cisalhamento diminuindo, assim, o atrito interno na zona de cisalhamento. Para grãos de urucum, foi evidenciado pelo autor que, com o aumento do teor de umidade, a camada que envolve o grão (bixina) funciona como um lubrificante, diminuindo a força de coesão e provocando a diminuição dos ângulos de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno.

Pode-se também verificar no Quadro 10 que o efetivo ângulo de atrito interno dos grãos de ambas variedades foi estatisticamente superior aos outros dois ângulos e, o ângulo de atrito interno foi superior estatisticamente ao de repouso em, praticamente, todos os teores de umidade analisados, não sendo superior somente para a variedade Catuaí-Vermelho, no menor teor e para a Conillon, nos dois menores teores. Este resultado concorda parcialmente com GOMES (2001), que afirma ser o ângulo de atrito interno normalmente maior que o de repouso.

Os coeficientes das equações lineares ajustadas, acompanhados dos respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e erro médio relativo (P), encontram-se no Quadro 11.

Quadro 11 – Coeficientes das equações ajustadas para se calcular as propriedades físicas instantâneas dos grãos de café com pergaminho das variedades Catuaí-Vermelho e Conillon, em função do teor de umidade do produto (U), com os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e erro médio relativo (P)

Ângulo de Atrito	Coeficientes de Regressão		$R^2$	P
	$\beta_0$	$\beta$		
	Catuaí-Vermelho			
Interno	32,1170	$32,0356 \times 10^{-2}$ *	0,8806	0,0112
Efetivo	34,7554	$35,1435 \times 10^{-2}$ *	0,9647	0,0060
Repouso	32,9560	0,1163 *	0,8942	0,0410
	Conillon			
Interno	30,1812	$17,7445 \times 10^{-2}$ *	0,8749	0,0084
Efetivo	30,4525	$28,9606 \times 10^{-2}$ *	0,9653	0,0063
Repouso	29,6720	0,1235 *	0,9388	0,0032

\* Significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste T.

Nas Figuras 19 e 20 são apresentadas as médias dos valores experimentais e estimados dos ângulos de atrito interno, de repouso, e do efetivo ângulo de atrito interno instantâneos dos grãos de café, das variedades Catuaí-Vermelho e Conillon, em função do teor de umidade do produto.

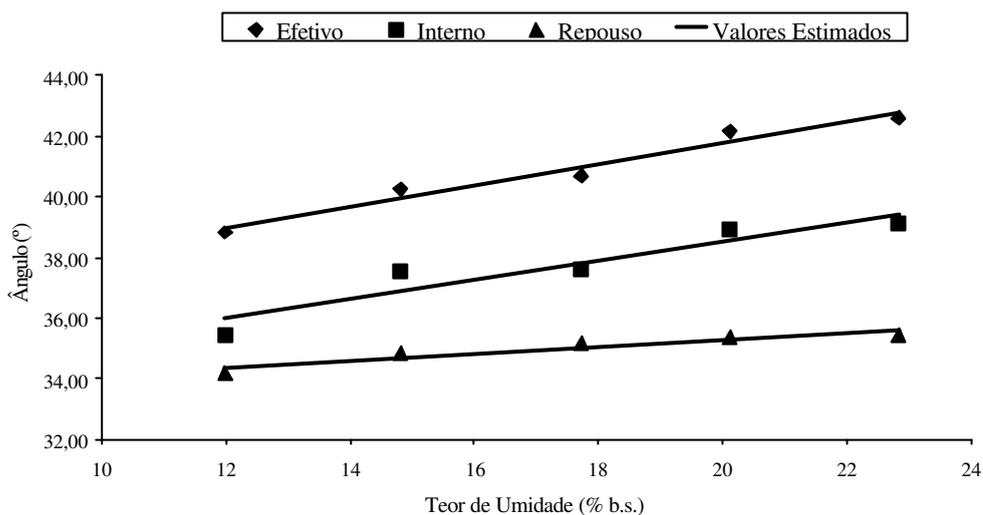


Figura 19 – Valores experimentais e estimados dos ângulos de atrito interno e de repouso e do efetivo ângulo de atrito interno da variedade Catuaí-Vermelho, em função do teor de umidade do produto (U).

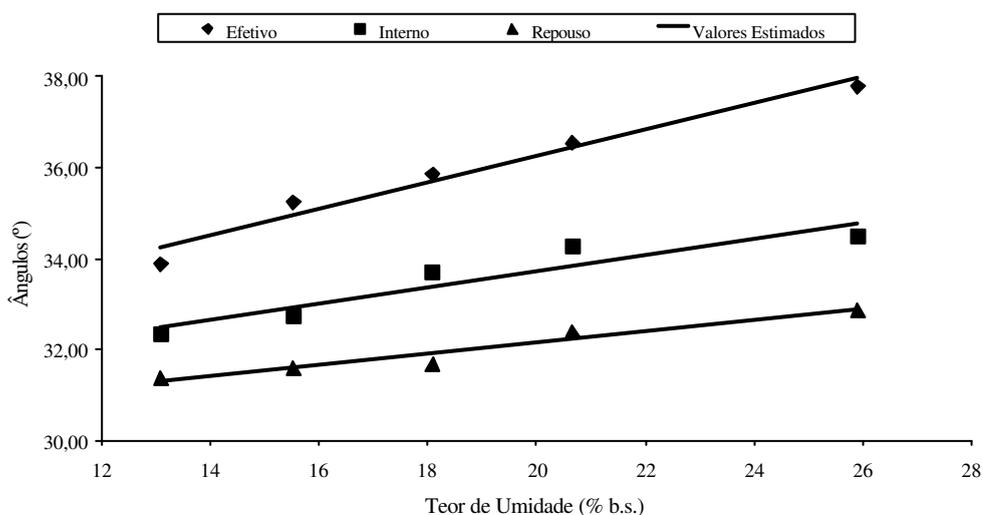


Figura 20 – Valores experimentais e estimados dos ângulos de atrito interno e de repouso e do efetivo ângulo de atrito interno da variedade Conillon, em função do teor de umidade do produto (U).

Observa-se, no Quadro 11, e nas Figuras 19 e 20, a existência de correlação linear positiva entre os valores médios do ângulo de repouso para ambas variedades de café estudadas e o teor de umidade, ou seja, a redução dos valores de umidade está associada à diminuição das propriedades físicas do produto. Isto significa que esta característica física aumenta linearmente com o aumento do teor de umidade, sendo esta tendência também verificada por diversos autores para vários produtos agrícolas (MOHSENIN, 1970; BENEDETTI, 1987; JOSHI et al., 1993; SINGH e GOSWAMI, 1996; SUTHAR e DAS, 1996; VISVANATHAN et al., 1996; GUPTA e DAS, 1997; NIMKAR e CHATTOPADHYAY, 2001; BARYEH, 2002; KALEEMULLAH e GUNASEKAR, 2002). Outros autores, em número reduzido, apresentaram outras relações estatísticas (polinômio de 2º e exponencial) entre esta propriedade física e o teor de umidade (BENEDETTI, 1987; DUTTA et al., 1988; JHA, 1993; LIMA et al., 1997; AVIARA et al., 1999).

Para o caso do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno, os resultados médios apresentam a mesma correlação positiva com o teor de umidade para ambas variedades dos grãos de café com pergaminho, ou seja, estas propriedades físicas aumentam linearmente com o aumento do teor de umidade. Para os ângulos de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno, a determinação dos limites superior e inferior é importante para que os projetistas possam utilizar o método dos estados limites com o objetivo da realização de projetos estruturais mais seguros e econômicos, visto que os limites superiores são tomados para o projeto de fluxo e os inferiores para o projeto de ações (pressões) (CALIL JÚNIOR, 1990; NASCIMENTO, 1996; CALIL JÚNIOR et al., 1997).

No Quadro 12 são apresentados os limites superior e inferior e o intervalo de confiança dos ângulos de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno dos grãos de café das variedades Catuaí-Vermelho e Conillon.

Estes limites são apresentados para diversos produtos, por vários autores (KAMATH et al., 1994; DUFFY e PURI, 1996; BARRÊTO, 1997; CALIL JÚNIOR et al., 1997; ZOU e BRUSEWITZ, 2001, 1999; NASCIMENTO et al., 2001a,b; NASCIMENTO et al., 2002a,b).

O limite inferior foi obtido no menor teor de umidade e o superior no maior para ambas as propriedades físicas e espécies. Pode-se observar, no Quadro 12, que os dois limites, assim como os valores das médias (Quadro 9), são influenciados pelo

Quadro 12 – Limites superior e inferior e intervalo de confiança do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno dos grãos de café, determinados pelo equipamento de Jenike

Teor de Umidade (% b.s.)	Limites Determinados Experimentalmente		Limites Determinados pelo Intervalo de Confiança (95%)		
	Inferior	Superior	Inferior	Média	Superior
Ângulo de Atrito Interno					
Catuaí-Vermelho					
11,98	34,22	38,66	33,83	35,45	39,05
14,82	34,90	40,92	34,15	37,55	40,95
17,72	35,35	41,16	35,39	37,60	41,81
20,11	36,22	41,91	35,98	38,92	41,86
22,82	37,02	42,27	37,23	39,08	42,93
Conillon					
13,10	31,38	33,57	31,59	32,33	33,60
15,53	31,57	34,00	31,82	32,72	34,62
18,09	32,00	34,82	32,05	33,69	34,63
20,66	32,92	35,05	32,40	34,26	35,12
25,91	33,48	35,51	33,26	34,46	35,27
Efetivo Ângulo de Atrito Interno					
Catuaí-Vermelho					
11,98	36,76	41,11	36,13	38,82	41,52
14,82	38,39	41,99	37,74	40,23	41,93
17,72	39,08	42,40	39,31	40,69	42,98
20,11	41,14	43,47	41,01	42,17	43,76
22,82	41,19	43,88	41,43	42,60	43,77
Conillon					
13,10	32,16	36,08	32,05	33,87	37,19
15,53	33,91	37,17	33,52	35,24	37,59
18,09	33,95	37,44	33,83	35,86	37,75
20,66	34,11	38,16	34,13	36,53	38,93
25,91	37,19	38,40	36,93	37,78	38,86

teor de umidade. No Quadro 12, pode ser observado que, em geral, os limites inferior e superior encontram-se dentro do intervalo de confiança.

De acordo com MOHSEIN (1986), assim como para o atrito externo, ao longo dos anos, vários equipamentos foram utilizados para determinação do ângulo de atrito interno instantâneo dos mais diversos produtos. Em virtude disso, no Quadro 13 é apresentada uma comparação entre os resultados obtidos para os ângulos de atrito interno dos grãos de café das duas variedades estudadas,

Quadro 13 – Comparação dos resultados dos ângulos de atrito interno dos grãos de café das variedades Catuaí-Vermelho e Conillon, com diferentes teores de umidade, determinados por diferentes equipamentos

Ângulo de Atrito Interno			
Teor de Umidade (% b.s.)	Equipamento		
	Jenike	Plano Inclinado	Arraste
Catuaí-Vermelho			
11,98	35,45 C	38,12 B	41,21 A
14,82	37,55 B	38,80 B	42,98 A
17,72	37,60 C	39,18 B	45,81 A
20,11	38,92 B	39,40 B	47,32 A
22,82	39,08 B	39,97 B	47,80 A
Conillon			
13,10	34,74 A	32,32 B	34,57 A
15,53	35,25 B	32,72 C	36,84 A
18,09	35,28 B	33,69 C	37,84 A
20,66	39,80 A	34,26 B	39,70 A
25,91	39,88 B	34,46 C	41,53 A

As médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas não diferem, estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

determinados pelo equipamento oficial de inúmeras normas internacionais de silos, ou seja, o equipamento de cisalhamento de Jenike e dois considerados alternativos, que são: o plano inclinado e o de arraste. Observa-se, no Quadro 13, que, para todos os teores de umidade, os resultados obtidos pelo equipamento experimental de arraste foi superior estatisticamente aos resultados obtidos pelo plano inclinado e o Jenike. Para variedade Catuaí-Vermelho, os resultados obtidos com o equipamento de Jenike e o plano inclinado foram diferentes estatisticamente somente para os teores de umidade de 11,90 e 17,72% b.s., sendo que para os demais teores não diferiram estatisticamente. Para variedade Conillon, os resultados obtidos com o plano inclinado foram menores estatisticamente aos obtidos pelo equipamento de Jenike, sendo os resultados obtidos por este equipamento diferentes estatisticamente do de arraste para os teores de umidade de 15,53, 18,59 e 25,91% b.s., não diferindo estatisticamente para os demais teores de umidade.

Estas diferenças nos resultados se devem, possivelmente, aos mesmos motivos já apresentados para o atrito com a parede (externo).

No Quadro 13, pode-se, ainda, observar que os resultados determinados pelo equipamento experimental de arraste superestimaram os resultados obtidos pelo equipamento de Jenike em todos os teores de umidade na variedade Catuaí-Vermelho, sendo, as diferenças proporcionadas pelos equipamentos alternativos podendo chegar a, aproximadamente, 22 e 7% para o ângulo de atrito interno das variedades Catuaí-Vermelho e Conillon, respectivamente.

### **4.3. Atrito interno com tempo de consolidação**

#### **4.3.1 Ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno**

No Quadro 14 são apresentados os valores médios com os respectivos desvios-padrão (DP) das propriedades físicas ângulo de atrito interno ( $\phi_{it}$ ) e efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_{et}$ ), ambas em função do teor de umidade e do tempo de consolidação, determinados pelo equipamento de cisalhamento de Jenike, dos grãos de café das variedades Catuaí-Vermelho e Conillon. Observa-se, com os resultados obtidos, que existe tendência de acréscimo dos valores do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno com o aumento do teor de umidade e do tempo de consolidação em ambas variedades avaliadas nas análises. A tendência de acréscimo dos ângulos em função do aumento do teor de umidade para as duas variedades ocorre em todos os tempos de consolidação.

O provável motivo desta tendência já foi comentado anteriormente para a condição sem consolidação, ou seja, instantânea. Concordando com o efeito do teor de umidade sobre os ângulos de atrito interno e efetivo, pode-se observar esta mesma tendência de aumento do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno com o aumento do tempo de consolidação, fato que se deve, possivelmente, à resistência adquirida pelos grãos de ambas variedades quando armazenado sob carga, pois ocorre deformação lenta dos grãos sobre carregamento e, com isso, dificulta o deslizamento dos grãos durante o cisalhamento, aumentando assim, a força de atrito interno e, conseqüentemente, seus ângulos de atrito, concordando com CALIL JÚNIOR (1990).

Quadro 14 – Valores médios das propriedades físicas dos grãos de café das variedades Catuaí-Vermelho e Conillon determinados pelo equipamento de cisalhamento de Jenike, em função do teor de umidade e do tempo de consolidação

Teor de Umidade (% b.s.)	Tempo de Consolidação (h)							
	0		6		12		24	
<b>Catuaí-Vermelho</b>								
Ângulo de Atrito Interno								
	(°)	DP	(°)	DP	(°)	DP	(°)	DP
11,98	35,45 C c	1,44	37,55 B c	2,29	37,66 B c	1,18	38,63 A c	1,76
14,82	37,55 C b	2,15	38,20 BC bc	1,85	38,67 AB bc	1,84	39,30 A bc	1,70
17,72	37,60 C b	1,97	39,00 B b	1,69	39,16 B b	1,50	40,22 A b	1,63
20,11	38,92 B a	1,73	39,26 B ab	1,06	39,33 B ab	1,45	41,80 A a	1,85
22,82	39,08 C a	1,65	40,32 B a	1,76	40,42 B a	1,38	42,54 A a	2,77
Efetivo Ângulo de Atrito Interno								
11,98	38,82 C c	1,52	42,07 B d	0,47	42,66 A d	1,09	42,69 A c	1,36
14,82	40,23 D b	1,33	42,57 C cd	0,21	44,20 B c	1,08	45,48 A b	0,93
17,72	40,69 C b	1,24	43,05 B c	0,64	45,02 A b	0,85	45,62 A b	0,73
20,11	42,17 D a	0,77	44,15 C b	0,46	45,85 B a	0,60	46,95 A a	0,79
22,82	42,60 D a	1,05	44,78 C a	1,01	46,34 B a	0,44	47,50 A a	1,08
<b>Conillon</b>								
Ângulo de Atrito Interno								
13,10	32,33 B c	0,65	32,50 B c	0,61	32,56 B c	0,51	33,08 A c	0,63
15,53	32,72 B bc	0,81	32,84 AB c	0,76	32,88 AB c	0,71	33,29 A c	0,96
18,09	33,69 B ab	0,84	33,76 AB ab	0,62	34,12 AB b	0,55	34,38 A b	0,73
20,66	34,26 B a	0,77	34,20 B a	0,70	34,74 A a	0,79	34,91 A b	1,52
25,91	34,46 C a	0,72	34,68 BC a	1,01	35,23 B a	1,00	36,14 A a	1,88
Efetivo Ângulo de Atrito Interno								
13,10	33,87 C c	1,18	34,32 BC d	0,82	34,88 AB d	0,69	35,31 A e	0,73
15,53	35,24 B bc	1,20	35,25 B c	1,05	35,38 B d	1,15	36,72 A d	1,22
18,09	35,86 C b	1,08	35,88 C c	1,12	36,92 B c	1,02	37,64 A c	1,13
20,66	36,53 B b	1,25	37,96 AB b	0,83	38,17 AB b	0,64	38,54 A b	0,61
25,91	37,78 C a	0,43	38,71 B a	0,78	39,34 A a	1,10	40,37 A a	2,28

Médias seguidas pela mesma letra minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas, não diferem, estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

DP = Desvio-padrão.

Pode-se verificar, no Quadro 14, que, basicamente, para o ângulo de atrito interno de ambas as variedades, existe uma diferença discreta entre o tempo 0 e 24 horas, sendo que entre 6 e 12 horas praticamente não existe. Para o efetivo ângulo de atrito interno, a diferença significativa entre os tempos de consolidação é mais notada.

Para variedade Catuaí-Vermelho, pode-se determinar, pelos resultados apresentados no Quadro 14, que, para o ângulo de atrito interno, o efeito do teor de umidade chegou a representar um aumento de até 10% enquanto, para o tempo de consolidação, este aumento foi no máximo de 9%, e para o efetivo ângulo de atrito interno foi de 13 e 11%, respectivamente, para os efeitos do teor de umidade e do tempo de consolidação. Através destas variações pode-se constatar que, para esta variedade, praticamente o teor de umidade e o tempo de consolidação apresentam efeitos da mesma ordem de grandeza, ou seja, ambos fatores influenciam de forma muito semelhante os ângulos, não sendo possível detectar qual é responsável pela maior influência.

Já para variedade Conillon, as variações máximas devido ao teor de umidade e tempo de consolidação no ângulo de atrito interno e no efetivo ângulo de atrito interno foram, respectivamente, 9, 5, 14 e 7%, onde é possível verificar que o efeito causado pelo teor de umidade chega a ser praticamente o dobro do tempo de consolidação, permitindo supor que esta variedade é, possivelmente, mais afetada pelo teor de umidade do que pelo tempo de consolidação.

Os coeficientes das equações ajustadas, acompanhados dos respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e erro médio relativo (P) encontram-se no Quadro 15.

Nas Figuras 21 a 24 são apresentadas as médias dos valores experimentais e estimados do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno dos grãos de café com pergaminho das duas variedades, em função do teor de umidade do produto e do tempo de consolidação.

Observa-se, no Quadro 15 e nas Figuras 21 a 24, a existência de correlação positiva entre os valores médios do ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno, para ambas variedades dos grãos de café com pergaminho, com o teor de umidade e o tempo de consolidação, ou seja, a redução dos valores de umidade e do tempo de consolidação está associada com a diminuição destas propriedades físicas do produto, mostrando que esta característica física aumenta linearmente com o aumento do teor de umidade e do tempo de consolidação. O modelo adotado representou bem o fenômeno, visto apresentar alto coeficiente de correlação ( $R^2 > 87\%$ ) e baixo erro relativo ( $P < 1,62\%$ ).

Quadro 15 – Coeficientes das equações ajustadas para se calcular as propriedades físicas dos grãos de café das variedades Catuaí-Vermelho e Conillon, em função do teor de umidade do produto (U) e do tempo de consolidação (TC), com os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e erro médio relativo (P)

Ângulo de Atrito	Coeficientes de Regressão			$R^2$	P
	$\beta_0$	$\beta$	$\beta_2$		
Catuaí-Vermelho					
Interno	32,7466	$10,9010 \times 10^{-2}^*$	$29,3984 \times 10^{-2}^*$	0,9269	0,0096
Efetivo	35,7711	$18,7429 \times 10^{-2}^*$	$33,9216 \times 10^{-2}^*$	0,8734	0,0162
Conillon					
Interno	29,5691	$37,6856 \times 10^{-3}^*$	$20,7616 \times 10^{-2}^*$	0,9191	0,0073
Efetivo	29,1851	$77,3238 \times 10^{-3}^*$	$36,2662 \times 10^{-2}^*$	0,9575	0,0073

\* Significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste T.

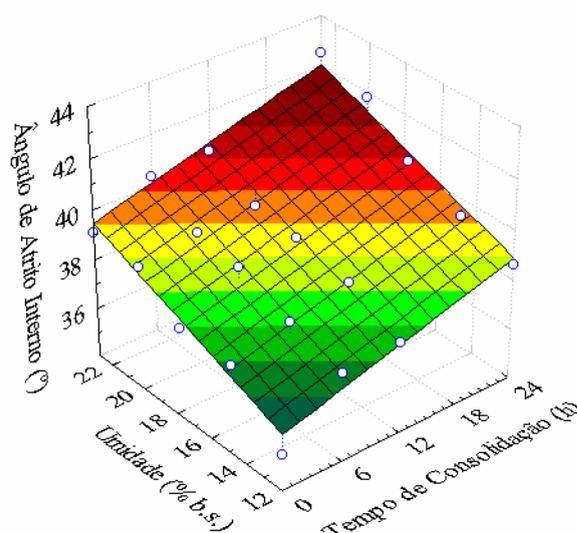


Figura 21 – Valores experimentais e estimados do ângulo de atrito interno da variedade Catuaí-Vermelho, em função do teor de umidade (U) e tempo de consolidação (TC).

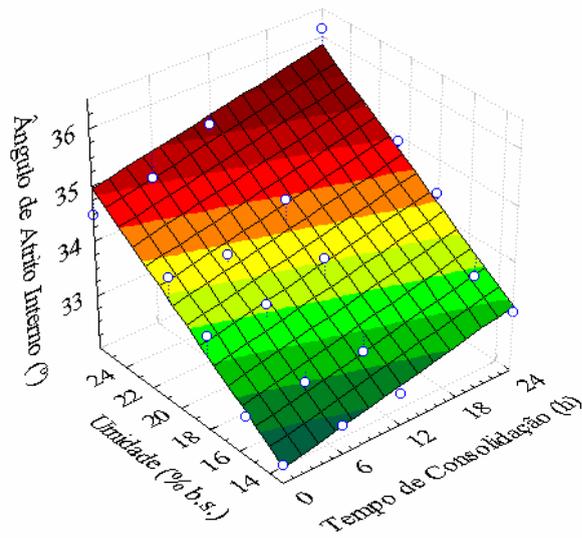


Figura 22 – Valores experimentais e estimados do ângulo de atrito interno da variedade Conillon, em função do teor de umidade (U) e tempo de consolidação (TC).

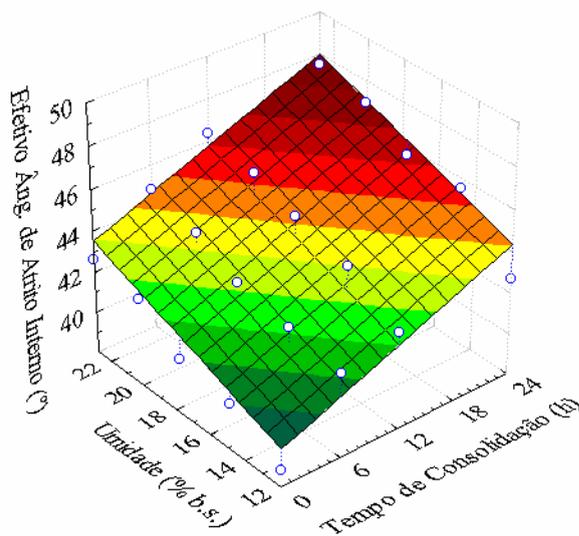


Figura 23 – Valores experimentais e estimados do efetivo ângulo de atrito interno da variedade Catuaí-Vermelho, em função do teor de umidade (U) e tempo de consolidação (TC).

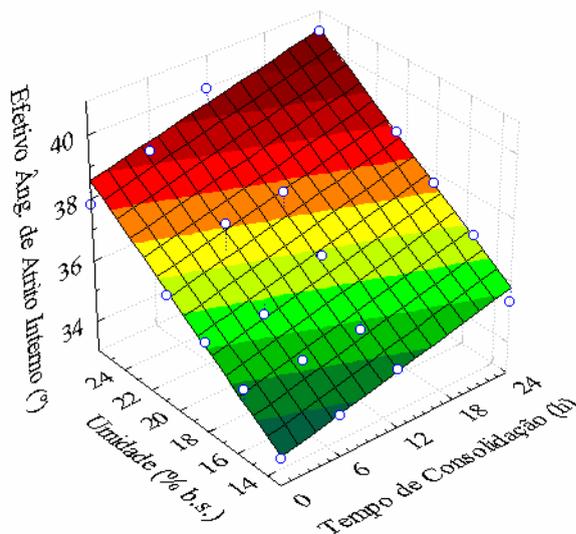


Figura 24 – Valores experimentais e estimados do efetivo ângulo de atrito interno da variedade Conillon, em função do teor de umidade (U) e tempo de consolidação (TC).

Nos Quadros 16 a 19 são apresentados os limites superior e inferior, a média e o intervalo de confiança dos ângulos de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno dos grãos de café com pergaminho das variedades Catuaí-Vermelho e Conillon.

Nos Quadros 16 a 19 pode-se observar que, assim como para as médias, os limites superior e inferior do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno dos grãos de café de ambas variedades apresentam a tendência de aumentar com o incremento do teor de umidade e do tempo de consolidação.

Verifica-se, nestes quadros, que os limites superior e inferior determinados estatisticamente para o intervalo de confiança de 95% foram muito semelhantes aos limites determinados experimentalmente apresentando-se na maioria dos tratamentos dentro do intervalo de confiança.

#### 4.4. Massa específica aparente

No Quadro 20 são apresentados os valores médios da propriedade física, massa específica aparente dos grãos de café das variedades Catuaí-Vermelho e Conillon, determinados por dois equipamentos e diferentes teores de umidade.

Quadro 16 – Limites superior e inferior e intervalo de confiança do ângulo de atrito interno, dos grãos de café da variedade Catuaí-Vermelho

Teor de Umidade (% b.s.)	Limites Determinados Experimentalmente		Limites Determinados pelo Intervalo de Confiança (95%)		
	Inferior	Superior	Inferior	Média	Superior
Tempo de Consolidação de Zero Hora					
11,98	34,22	38,66	33,83	35,45	39,15
14,82	34,90	40,92	34,35	37,55	40,95
17,72	35,35	41,16	35,39	37,60	41,61
20,11	36,22	41,91	36,03	38,92	41,86
22,82	37,02	42,27	37,23	39,08	42,71
Tempo de Consolidação de 6 Horas					
11,98	34,52	40,06	34,98	37,55	40,12
14,82	35,76	41,19	35,35	38,20	41,26
17,72	35,80	41,21	35,78	39,00	41,65
20,11	37,19	41,24	37,08	39,26	41,76
22,82	37,24	42,31	37,35	40,32	42,29
Tempo de Consolidação de 12 Horas					
11,98	35,62	40,23	35,34	37,66	39,98
14,82	36,58	41,31	36,61	38,67	41,73
17,72	37,42	42,08	37,48	39,16	42,83
20,11	37,79	42,50	37,71	39,33	42,94
22,82	38,51	42,97	38,87	40,42	43,26
Tempo de Consolidação de 24 Horas					
11,98	35,88	40,85	35,65	38,63	40,98
14,82	37,18	41,48	37,39	39,30	41,20
17,72	37,48	43,27	37,40	40,22	44,04
20,11	38,04	44,84	37,72	41,80	44,87
22,82	38,57	46,98	38,44	42,54	47,64

Quadro 17 – Limites superior e inferior e intervalo de confiança do ângulo de atrito interno, dos grãos de café da variedade Conillon

Teor de Umidade (% b.s.)	Limites Determinados Experimentalmente		Limites Determinados pelo Intervalo de Confiança (95 %)		
	Inferior	Superior	Inferior	Média	Superior
Tempo de Consolidação de Zero Hora					
13,10	31,38	33,57	31,08	32,33	33,66
15,53	31,57	34,00	31,42	32,72	34,02
18,09	32,00	34,82	32,05	33,69	34,93
20,66	32,92	35,05	33,00	34,26	35,12
25,91	33,48	35,51	33,24	34,46	35,77
Tempo de Consolidação de 6 Horas					
13,10	31,86	33,58	31,82	32,50	34,18
15,53	32,00	34,05	31,99	32,84	34,68
18,09	33,24	35,08	33,06	33,76	35,45
20,66	33,55	35,68	33,42	34,20	35,98
25,91	33,58	36,36	33,55	34,68	36,80
Tempo de Consolidação de 12 Horas					
13,10	32,00	33,63	31,98	32,56	34,13
15,53	32,33	34,61	32,09	32,88	34,67
18,09	33,66	35,12	33,51	34,12	35,74
20,66	33,58	36,22	33,55	34,74	36,63
25,91	34,00	36,62	34,12	35,23	36,96
Tempo de Consolidação de 24 Horas					
13,10	32,05	33,95	32,00	33,08	34,00
15,53	32,38	34,89	32,21	33,29	34,96
18,09	33,96	35,69	33,57	34,38	35,99
20,66	33,57	37,57	33,21	34,91	37,61
25,91	34,05	40,03	34,04	36,14	40,24

Quadro 18 – Limites superior e inferior e intervalo de confiança do efetivo ângulo de atrito interno, dos grãos de café da variedade Catuaí-Vermelho

Teor de Umidade (% b.s.)	Limites Determinados Experimentalmente		Limites Determinados pelo Intervalo de Confiança (95%)		
	Inferior	Superior	Inferior	Média	Superior
Tempo de Consolidação de Zero Hora					
11,98	36,76	41,11	36,23	38,82	41,32
14,82	38,39	41,99	38,44	40,23	41,90
17,72	39,08	42,40	39,11	40,69	42,38
20,11	41,14	43,47	41,30	42,17	43,53
22,82	41,19	43,88	41,03	42,60	43,77
Tempo de Consolidação de 6 Horas					
11,98	41,00	42,58	41,06	42,07	42,59
14,82	42,18	42,87	41,33	42,57	42,80
17,72	42,19	44,09	41,93	43,05	44,26
20,11	43,37	44,78	43,04	44,15	44,67
22,82	43,76	46,78	43,65	44,78	46,93
Tempo de Consolidação de 12 Horas					
11,98	41,39	44,16	41,45	42,66	44,62
14,82	42,69	45,66	42,25	44,20	45,95
17,72	43,07	45,87	43,18	45,02	45,98
20,11	44,85	46,68	44,59	45,85	46,53
22,82	45,46	46,85	45,24	46,34	46,83
Tempo de Consolidação de 24 Horas					
11,98	41,52	45,55	41,16	42,69	45,82
14,82	44,34	46,65	44,44	45,48	46,52
17,72	44,42	46,85	44,00	45,62	46,97
20,11	45,86	48,48	45,92	46,95	48,86
22,82	46,34	49,59	46,30	47,50	49,82

Quadro 19 – Limites superior e inferior e intervalo de confiança do efetivo ângulo de atrito interno, dos grãos de café da variedade Conillon

Teor de Umidade (% b.s.)	Limites Determinados Experimentalmente		Limites Determinados pelo Intervalo de Confiança (95%)		
	Inferior	Superior	Inferior	Média	Superior
Tempo de Consolidação de Zero Hora					
13,10	32,16	36,08	32,02	33,87	36,13
15,53	33,91	37,17	33,90	35,24	37,29
18,09	33,95	37,44	33,96	35,86	37,37
20,66	34,11	38,16	34,35	36,53	38,45
25,91	37,19	38,40	37,30	37,78	38,72
Tempo de Consolidação de 6 Horas					
13,10	33,50	35,44	33,41	34,32	35,24
15,53	34,05	37,25	34,08	35,25	37,51
18,09	34,86	38,04	34,64	35,88	39,17
20,66	37,05	39,40	37,04	37,96	39,60
25,91	37,57	39,71	37,32	38,71	39,89
Tempo de Consolidação de 12 Horas					
13,10	33,46	35,81	33,31	34,88	35,96
15,53	34,14	38,16	34,09	35,38	38,37
18,09	35,28	38,43	35,06	36,92	38,06
20,66	37,16	39,55	37,16	38,17	39,98
25,91	37,92	40,94	37,71	39,94	41,16
Tempo de Consolidação de 24 Horas					
13,10	34,31	36,61	34,49	35,31	36,83
15,53	34,52	38,68	34,35	36,72	38,82
18,09	35,26	38,98	33,17	37,64	38,90
20,66	37,44	39,71	37,05	38,54	39,72
25,91	38,03	44,65	37,83	40,37	44,76

Quadro 20 – Valores médios dos resultados da massa específica aparente em  $\text{kg.m}^{-3}$ , dos grãos de café das variedades Catuaí-Vermelho e Conillon, determinados por diferentes equipamentos, em função do teor de umidade do produto

Teor de Umidade (% b.s.)	Equipamento	
	Balança de Peso Hectolítrico	Célula de Cisalhamento de Jenike
	Catuaí-Vermelho	
22,82	454,64 A e	442,50 B c
20,11	441,96 A d	440,24 A c
17,72	428,30 A c	426,39 A b
14,82	417,74 B b	425,80 A b
11,98	412,34 B a	417,11 A a
	Conillon	
25,91	485,02 A d	464,07 B b
20,66	458,16 A c	462,25 A b
18,09	454,64 B c	460,25 A b
15,53	445,08 B b	455,83 A a
13,10	427,68 B a	453,40 A a

Médias seguidas pela mesma letra minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem, estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Observa-se no Quadro 20, tendência de redução da massa específica aparente dos grãos de café de ambas variedades com o decréscimo do teor de umidade, concordando com os resultados apresentados por COUTO et al. (1999) e AFONSO JÚNIOR (2001), que trabalharam também com grãos de café. Tal fato se deve, possivelmente, pela desidratação do produto reduzir os espaços intergranulares, modificando as suas dimensões e, por conseguinte, o seu volume, alterando a massa específica aparente do material, uma vez que a diminuição do volume do produto, e conseqüentemente do volume da massa granular, faz com que os espaços anteriormente ocupados por água sejam agora completados pela matéria seca dos grãos.

Esta redução se deve, também, ao fato de o pergaminho, película que envolve o grão de café, se contrair de forma diferenciada quando comparada com o grão, onde este sofre mudanças volumétricas mais acentuadas que o pergaminho. Isto faz com que o comportamento dessa propriedade física apresente-se de maneira diferente daquela apresentada pela maioria dos grãos agrícolas, cujos valores tendem a aumentar com o decréscimo do teor de umidade do produto (MOSHENIN, 1986; BROOKER et al., 1992).

Pode-se também observar no Quadro 20, que os resultados obtidos pelos dois equipamentos, em praticamente todos os teores de umidade foram diferentes estatisticamente, sendo, os obtidos pela célula de cisalhamento de Jenike superiores aos da balança de peso hectolítrico para os menores teores de umidade, tendência esta que é inversa para o teor de umidade mais elevado, mostrando que os resultados proporcionados pelo equipamento de Jenike, se possível, não devem ser utilizados, sendo sempre preferível utilizar o equipamento considerado oficial por vários países para determinação desta propriedade física, que é a balança de peso hectolítrico com capacidade de 1 litro, onde esta possui um recipiente de diâmetro igual a altura, minimizando assim o efeito da parede.

Os coeficientes das equações ajustadas, acompanhados dos respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e erro médio relativo (P), encontram-se no Quadro 21.

Quadro 21 – Coeficientes das equações ajustadas para se calcular a propriedade física massa específica aparente dos grãos de café com pergaminho das variedades Catuaí-Vermelho e Conillon, em função do teor de umidade do produto (U), com os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e erro médio relativo (P)

Equipamento	Coeficientes de Regressão		$R^2$	P
	$\beta_0$	$\beta$		
Catuaí-Vermelho				
Balança de Peso Hectolítrico	360,78	4,0145 *	0,9696	0,0058
Célula de Cisalhamento de Jenike	388,41	2,4014 *	0,9187	0,0049
Conillon				
Balança de Peso Hectolítrico	376,29	4,1713 *	0,9692	0,0067
Célula de Cisalhamento de Jenike	443,18	0,8566 *	0,9053	0,0026

\* Significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste T.

As curvas das equações ajustadas e os valores médios da massa específica aparente dos grãos de café das duas variedades analisadas, em função do teor de umidade do produto, podem ser visualizadas nas Figuras 25 e 26.

Observa-se, no Quadro 20 e nas Figuras 25 e 26, a existência de correlação linear positiva entre os valores médios da massa específica aparente de ambas as variedades estudadas dos grãos de café e o teor de umidade, ou seja, a redução dos

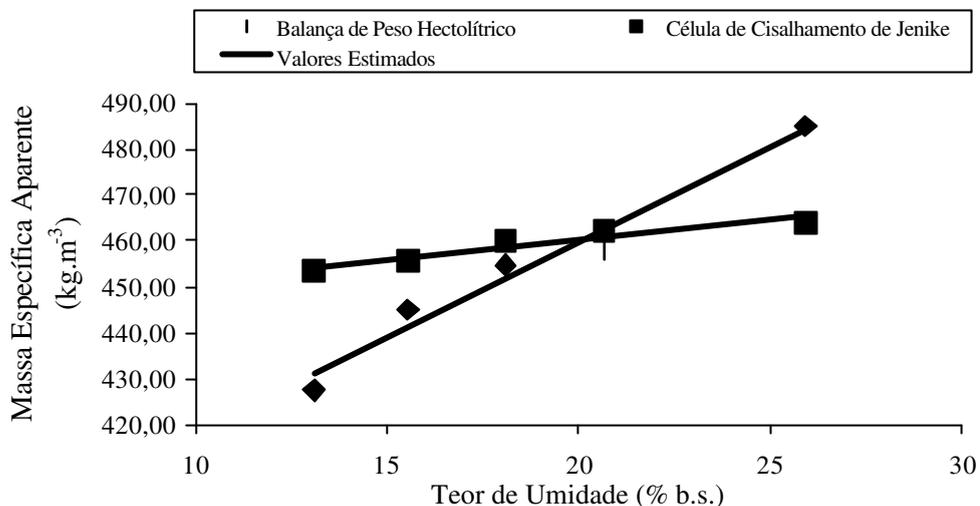


Figura 25 – Valores experimentais e estimados de massa específica aparente dos grãos de café da variedade Conillon, em função do teor de umidade do produto (U).

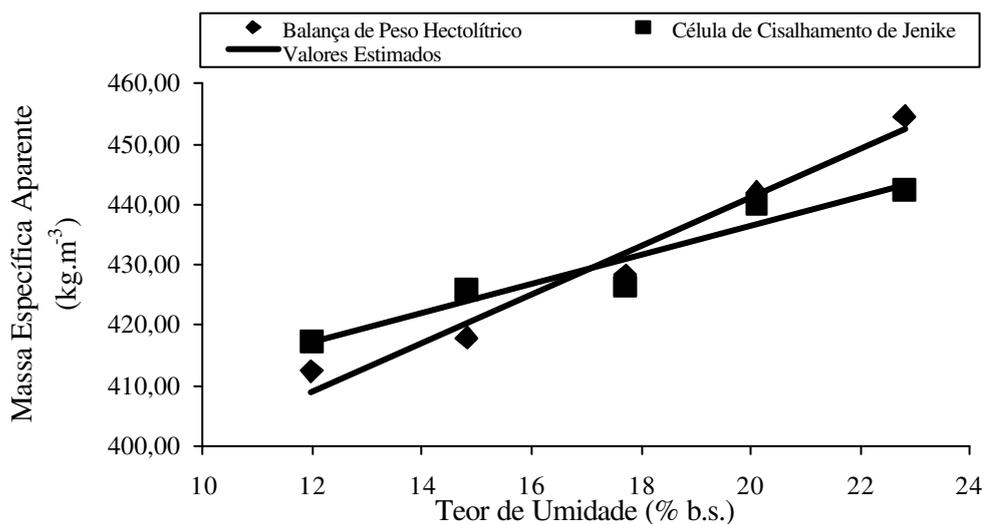


Figura 26 – Valores experimentais e estimados de massa específica aparente dos grãos de café da variedade Catuaí-Vermelho, em função do teor de umidade do produto (U).

valores de umidade está associada à diminuição das propriedades físicas do produto. Isto significa que esta característica física aumenta linearmente com o aumento do teor de umidade, sendo esta tendência também verificada por outros autores para vários produtos agrícolas. A opção pelo modelo linear, foi feita, principalmente, por apresentar  $R^2$  alto (superior a 90%), baixo erro (inferior a 1%) e significância do modelo e seus coeficientes.

#### 4.5. Função fluxo

No Quadro 22 são apresentados os índices calculados da função fluxo (FF) dos grãos de café das variedades Catuaí-Vermelho e Conillon calculados pela relação entre a tensão máxima de consolidação ( $\sigma_1$ ) e a resistência ao deslizamento ( $f_c$ ), em distintos tempos de consolidação e teores de umidade.

Quadro 22 – Valores calculados dos índices da função fluxo dos grãos de café de ambas as variedades, para diferentes tempos de consolidação e teores de umidade

Teor de Umidade (% b.s.)	Índice da Função fluxo			
	Tempo de Consolidação (h)			
	0	6	12	24
	Catuaí-Vermelho			
11,98	12,85	12,45	12,13	11,67
14,82	12,38	12,24	12,13	11,72
17,72	11,65	11,38	11,25	10,62
20,11	10,76	10,44	10,15	9,93
22,82	9,95	9,72	9,62	9,21
	Conillon			
13,10	14,06	12,95	12,18	11,03
15,53	11,86	11,24	10,57	10,12
18,09	11,32	10,86	10,43	10,00
20,66	11,05	10,73	10,27	9,83
25,91	10,32	10,10	9,89	9,71

Observa-se, no Quadro 22, que, para os resultados destes índices de função fluxo, quando comparados com a classificação geral de escoamento de sólidos apresentada por JENIKE (1980), os grãos de café de ambas variedades podem ser considerados como de fluxo livre ( $10 < FF$ ), tendendo a ser de fluxo fácil ( $4 < FF < 10$ ) com o aumento do teor de umidade e do tempo de consolidação. Para variedade Catuaí-Vermelho, independentemente do tempo de consolidação, no teor de umidade de 22,82% b.s., os grãos são classificados como de fluxo fácil, bem como para o teor de umidade de 20,11% b.s. no tempo de consolidação de 24 horas. Os grãos de café da variedade Conillon somente são de fluxo fácil nos tempos de consolidação de 12 horas e teor de umidade de 25,91% b.s. e no tempo de 24 horas nos dois maiores teores de umidade. Este índice da função fluxo foi também adotado por BARRÊTO (1997) e TEUNOU et al. (1999), entre outros.

Nas Figuras 27 a 30 são apresentadas as curvas da função fluxo dos grãos de café das espécies arábica e Conillon, em função do tempo de consolidação e do teor de umidade.

Observa-se, nas Figuras 27 a 30, que as curvas da função fluxo são influenciadas diretamente pelo teor de umidade e pelo tempo de consolidação, independentemente da variedade de café. O incremento do teor de umidade e do tempo de consolidação gera um aumento na tensão principal de consolidação ( $\sigma_1$ ) e na resistência ao deslizamento ( $f_c$ ) dos grãos de café, visto que as curvas da função fluxo apresentadas deslocam-se para cima no espaço  $f_c$ - $\sigma_1$ , aumentando também sua inclinação. Resultados semelhantes foram encontrados por vários autores, entre eles, KAMATH et al. (1994), BARRÊTO (1997), e TEUNOU et al. (1999), TEUNOU e FITZPATRICK (2000), que trabalharam com os mais diversos tipos de produtos, principalmente pós e grãos.

O comportamento das curvas da função fluxo deve-se, possivelmente, ao fato de existir maior coesão entre as partículas do produto com maior teor de umidade, o que dificulta seu fluxo e deslizamento. Com o aumento do tempo de consolidação, a massa de produto, provavelmente, tornou-se mais compacta na medida em que foi exposta à compressão por um período mais prolongado de consolidação. Com esta compactação, passou a existir mais regiões de contato entre os grãos pelo rearranjo das partículas e pela deformação plástica. Isto leva a uma maior interação de forças de coesão e, conseqüentemente, uma maior coesão com o passar do tempo, bem como o aumento do atrito ocasionado pelo movimento dos grãos entre si.

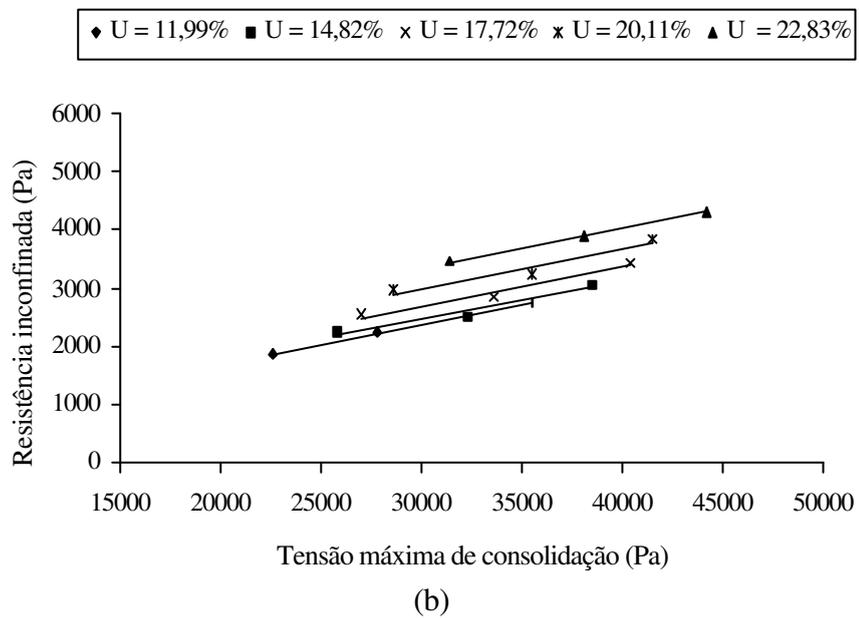
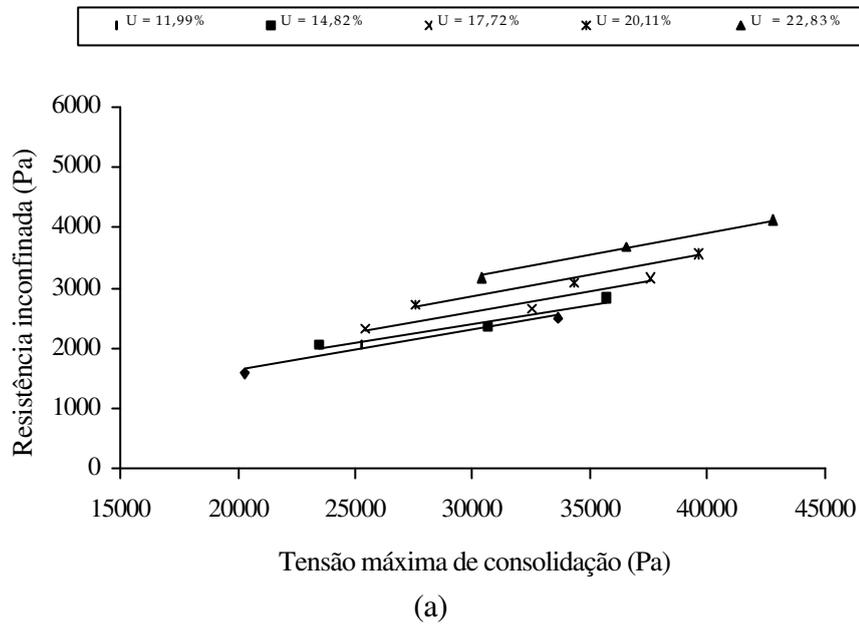


Figura 27 – Função de fluxo dos grãos de café da variedade Catuaí-Vermelho com diferentes teores de umidade em função do tempo de consolidação: a) 0 h e b) 6 h (Continua).

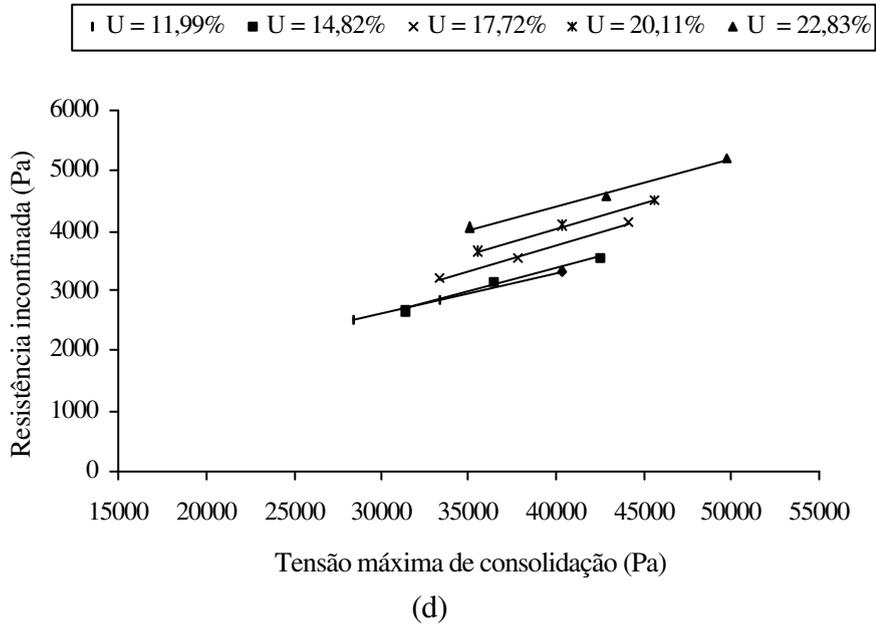
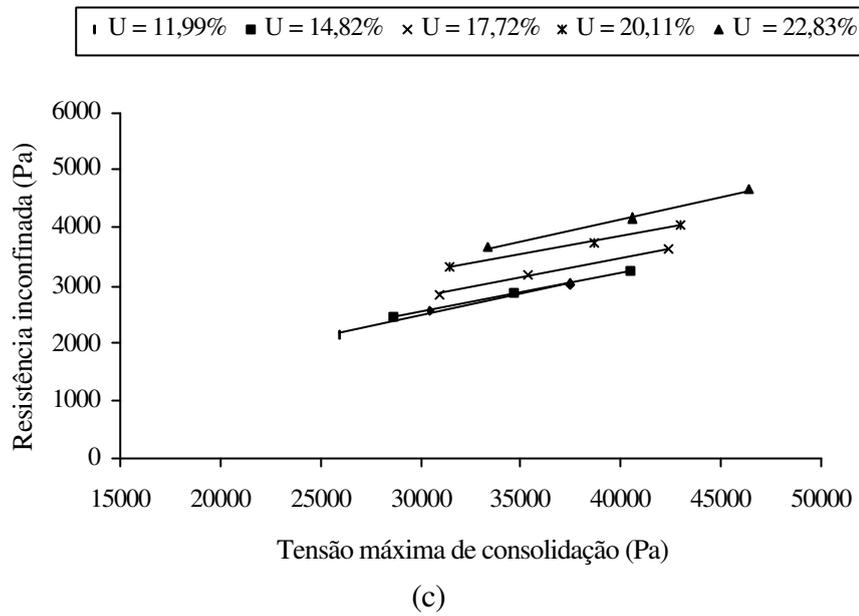


Figura 27 – (Continuação) Função de fluxo dos grãos de café da variedade Catuai-Vermelho com diferentes teores de umidade em função do tempo de consolidação: c) 12 h e d) 24 h.

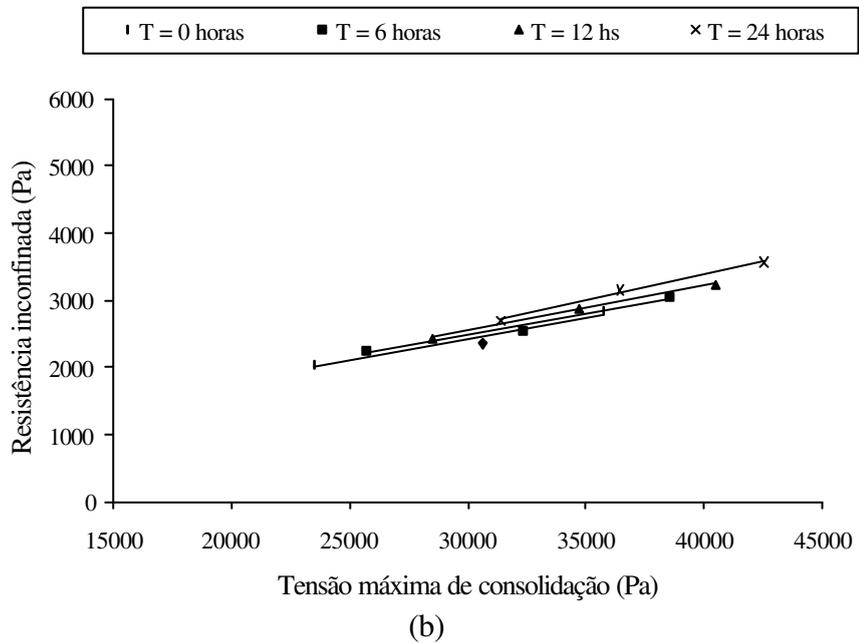
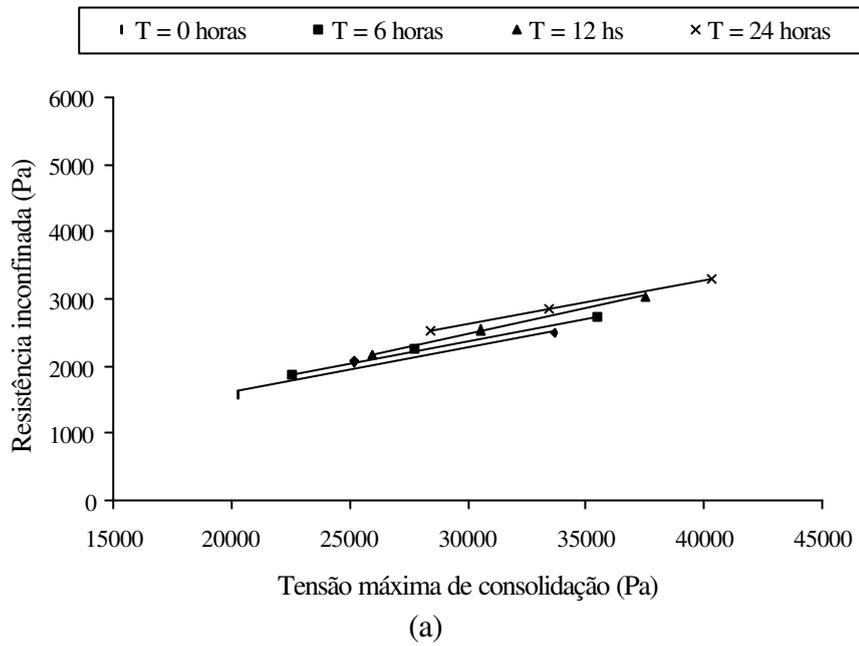


Figura 28 – Função de fluxo dos gros de café da variedade Catuaí-Vermelho com diferentes tempos de consolidação em função do teor de umidade: a) 11,99% e b) 14,82% (Continua).

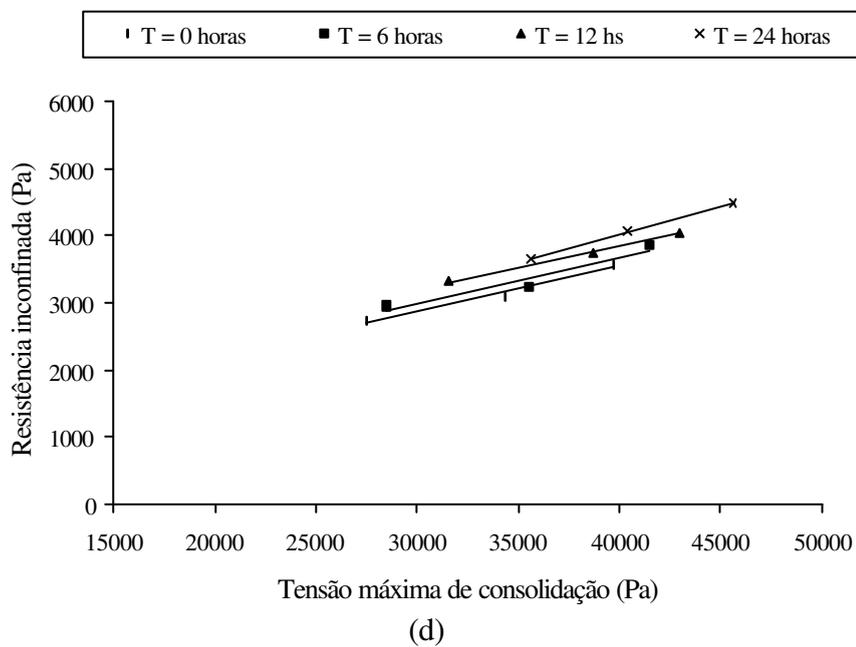
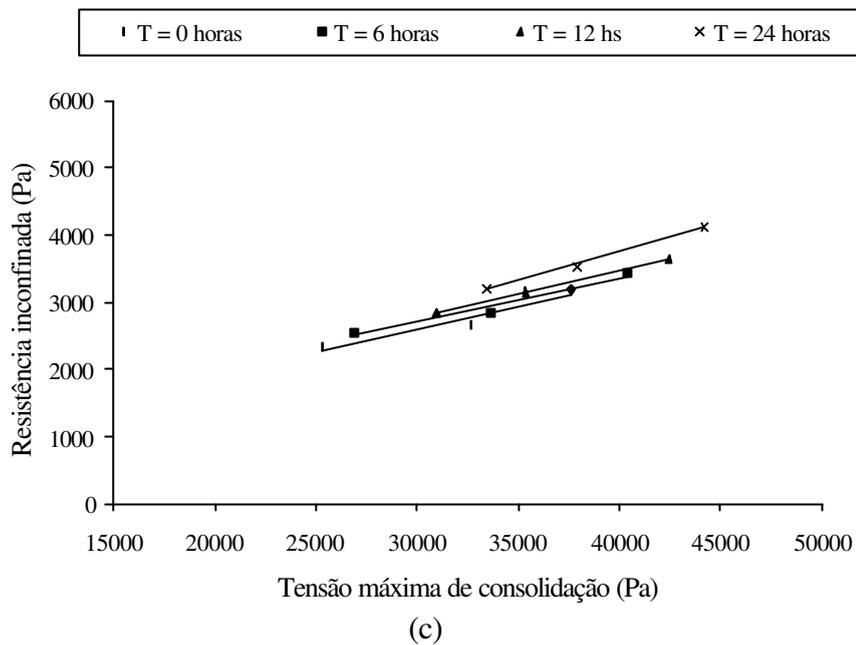
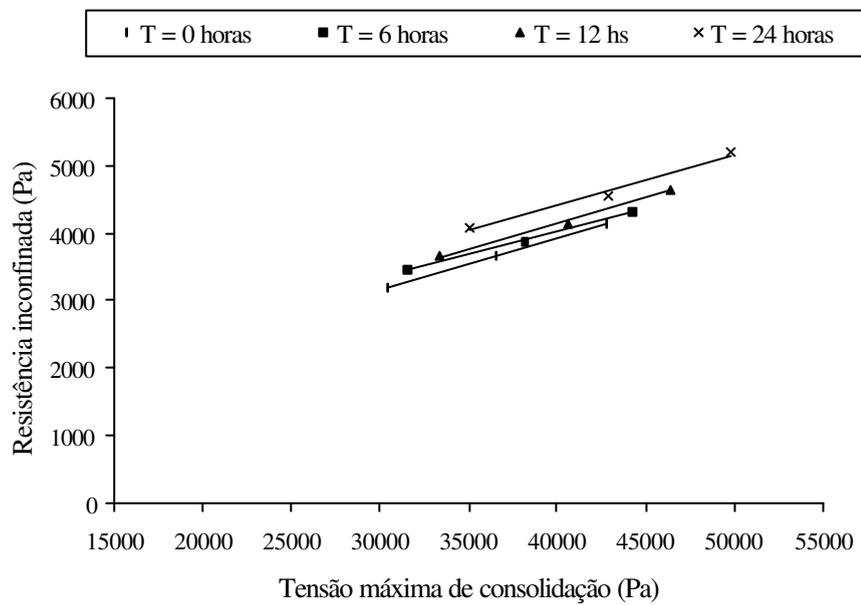


Figura 28 – (Continuação) Função de fluxo dos grãos de café da variedade Catuaí-Vermelho com diferentes tempos de consolidação em função do teor de umidade: c) 17,72 % e d) 20,11%.



(e)

Figura 28 – (Continuação) Função de fluxo dos grãos de café da variedade Catuaí-Vermelho com diferentes tempos de consolidação em função do teor de umidade: e) 22,83%.

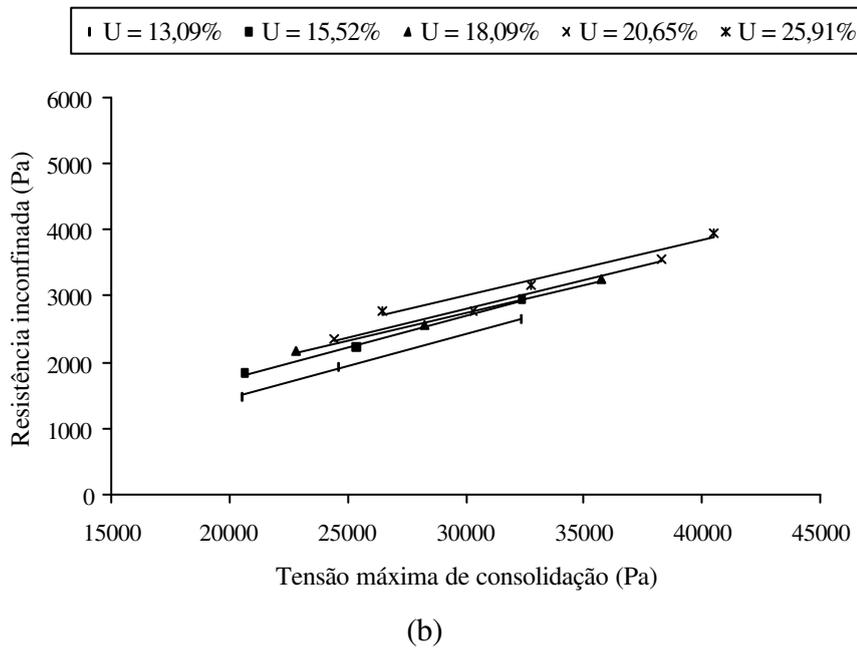
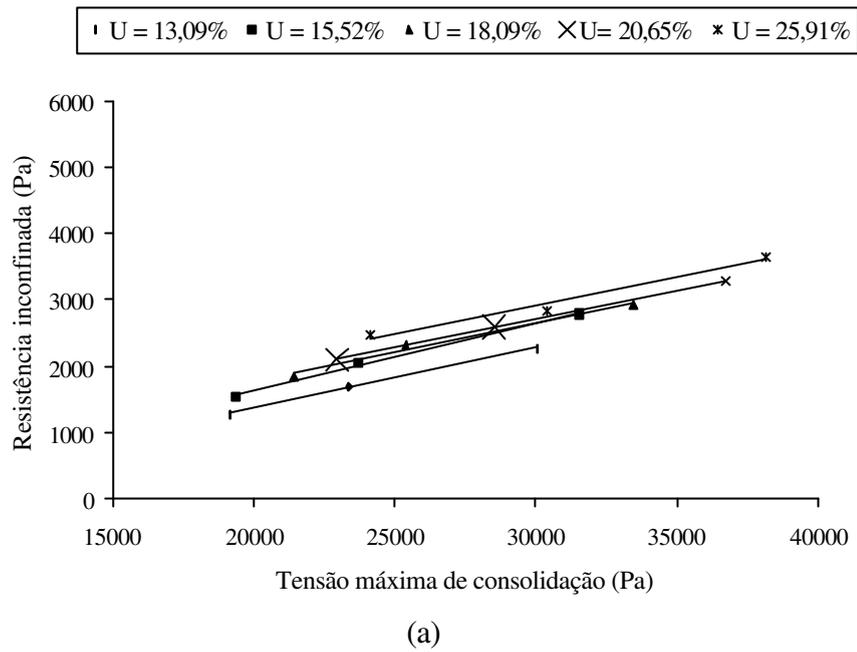
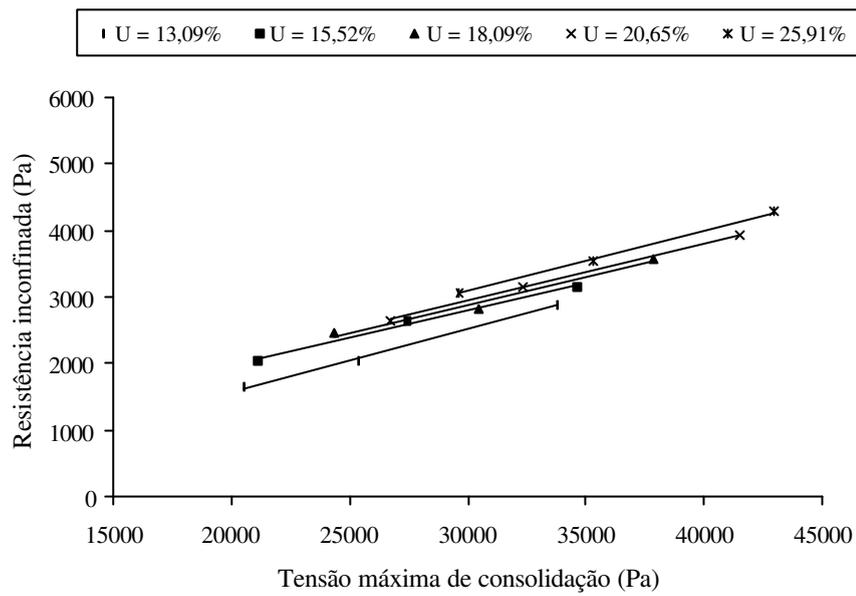
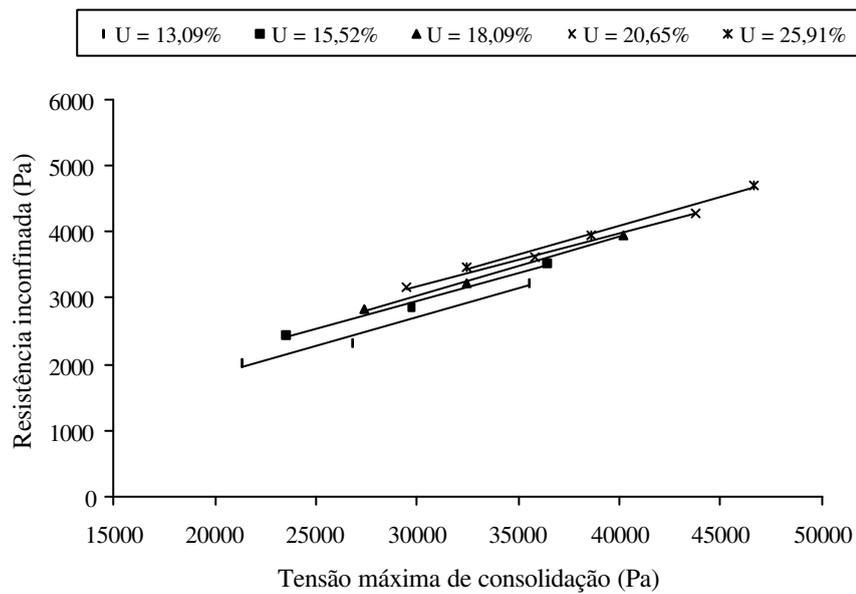


Figura 29 – Função de fluxo dos grãos de café da variedade Conillon com diferentes teores de umidade em função do tempo de consolidação: a) 0 h e b) 6 h (Continua).



(c)



(d)

Figura 29 – (Continuação) Função de fluxo dos grãos de café da variedade Conillon com diferentes teores de umidade em função do tempo de consolidação: c) 12 h e d) 24 h.

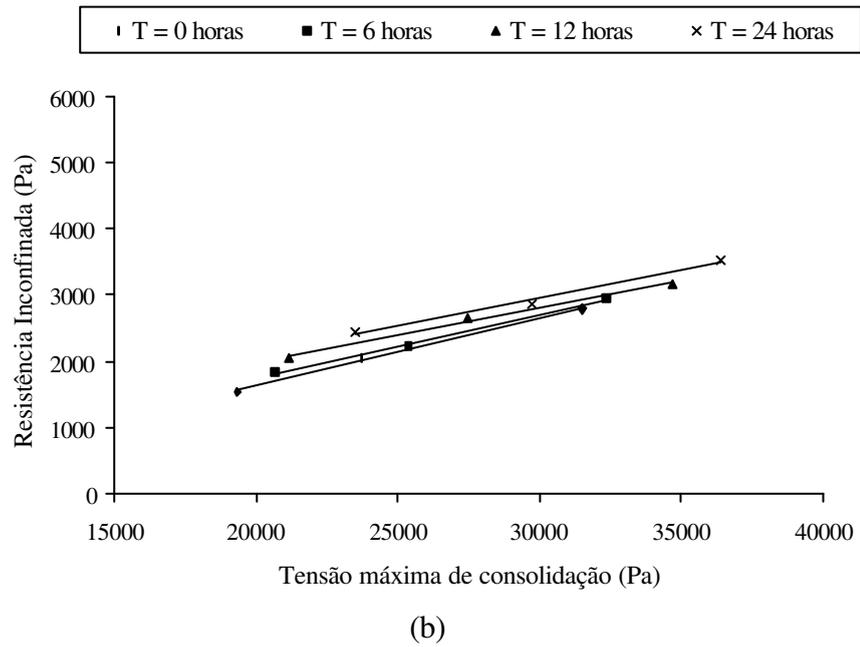
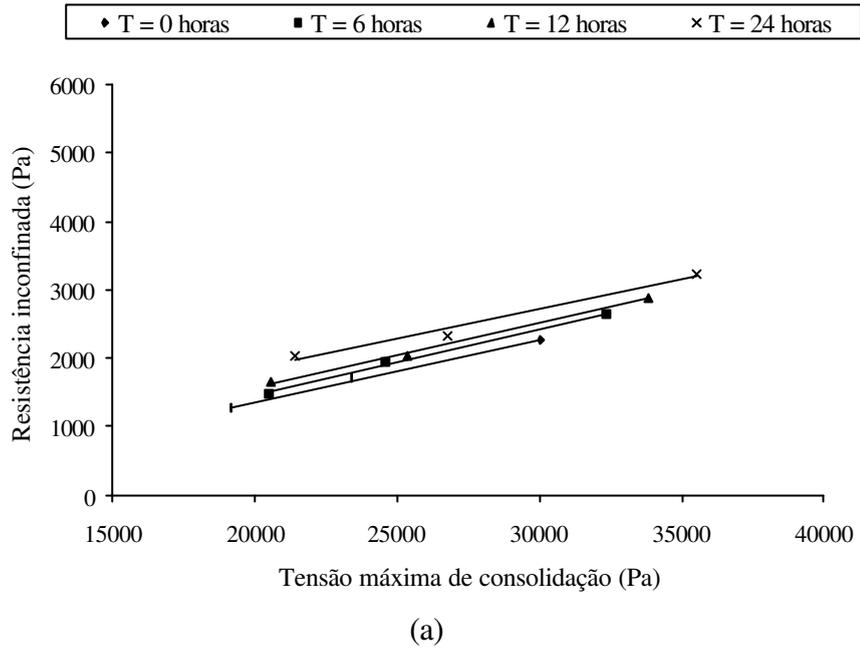


Figura 30 – Função de fluxo dos grãos de café da variedade Conillon com diferentes tempos de consolidação em função do teor de umidade: a) 13,09% e b) 15,52% (Continua).

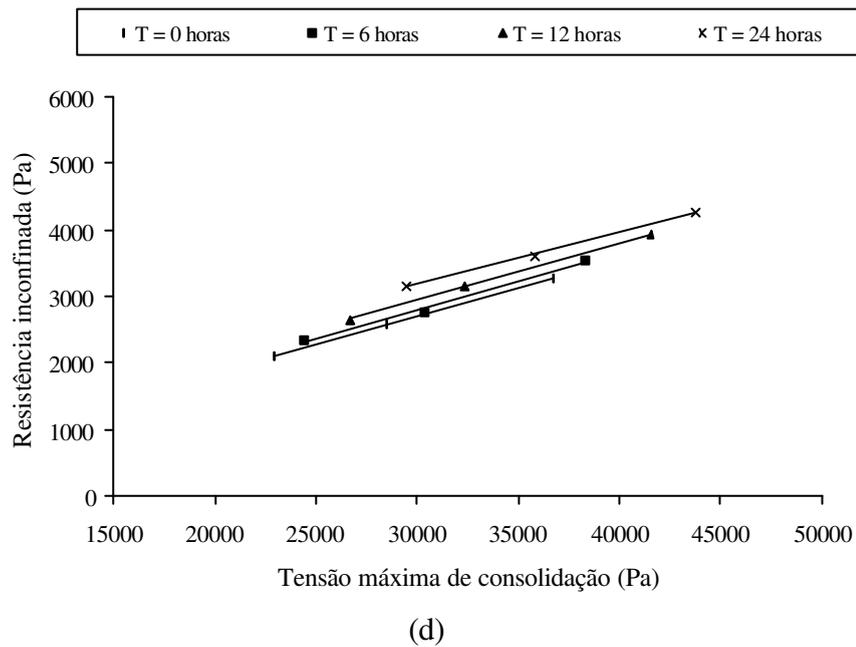
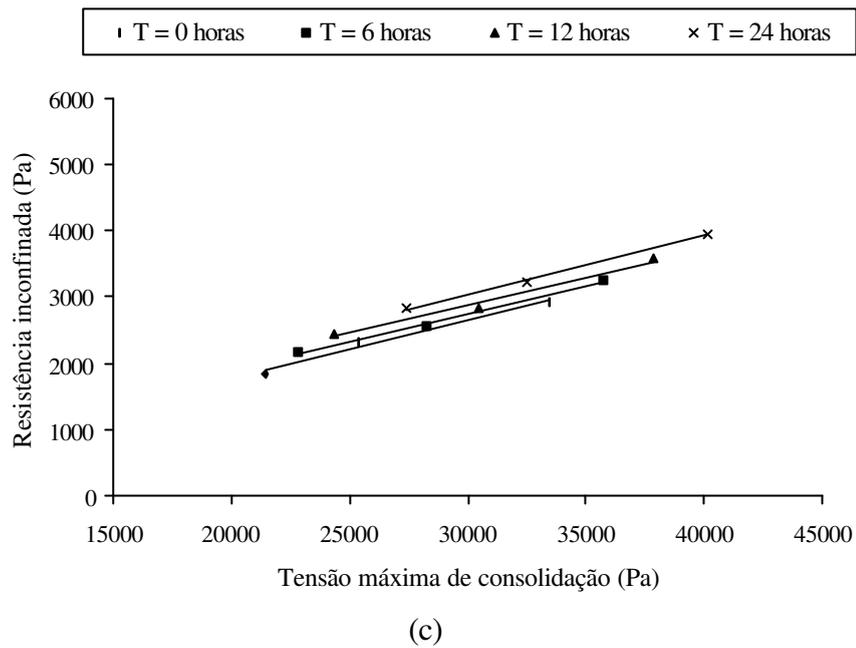
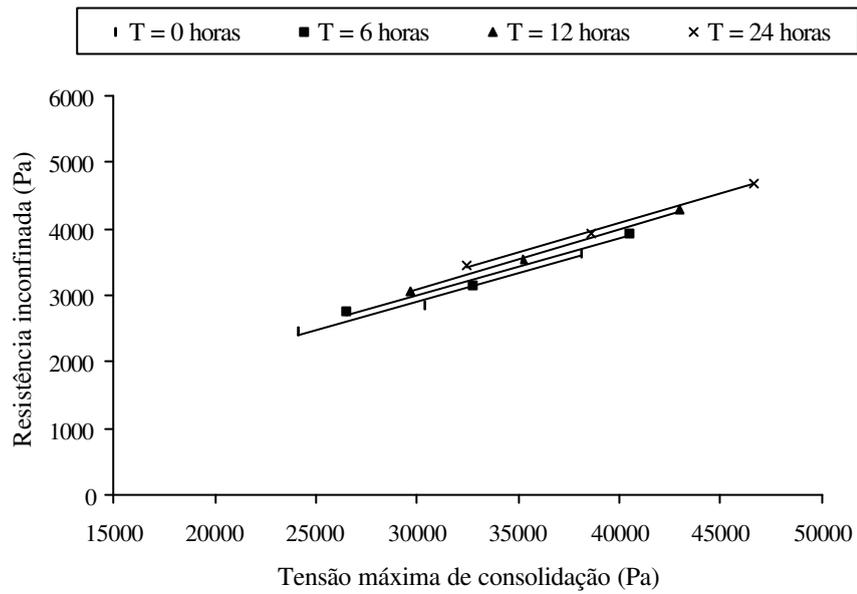


Figura 30 – (Continuação) Função de fluxo dos grãos de café da variedade Conillon com diferentes tempos de consolidação em função do teor de umidade: c) 18,09 % e d) 20,65%.



(e)

Figura 30 – (Continuação) Função de fluxo dos grãos de café da variedade Conillon com diferentes tempos de consolidação em função do teor de umidade: e) 25,91%.

## 5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos pôde-se concluir que:

- os coeficientes e ângulos de atrito estático e dinâmico dos grãos de café com pergaminhos de ambas as variedades aumentaram linearmente com o incremento do teor de umidade, dentro da faixa de umidade analisada, independentemente do material de parede;

- o atrito dos grãos com a parede foi mais influenciado pela rugosidade da superfície do material de parede do que pelo teor de umidade, sendo superiores para o aço rugoso e em ordem decrescente pelo concreto, madeira, aço liso, polietileno e alumínio;

- na variedade Catuaí-Vermelho, os limites inferior e superior do ângulo de atrito estático com a parede foram de, respectivamente, 24,19 e 26,30 no aço rugoso, 21,70 e 24,29 no concreto, 16,66 e 21,43 na madeira, 11,96 e 14,11 no aço liso, 12,35 e 12,99 no polietileno e 8,55 e 10,34 no alumínio, para teores de umidade variando entre 11,98 e 22,82% b.s.;

- na variedade Catuaí-Vermelho, os limites inferior e superior do ângulo de atrito dinâmico com a parede foram de, respectivamente, 23,51 e 25,47 no aço rugoso, 20,91 e 23,78 no concreto, 15,35 e 20,72 na madeira, 10,32 e 13,59 no aço liso, 10,28 e 11,78 no polietileno e 8,35 e 9,95 no alumínio, para teores de umidade variando entre 11,98 e 22,82% b.s.;

- na variedade Catuaí-Vermelho, os limites inferior e superior do coeficiente de atrito estático com a parede foram de, respectivamente, 0,4493 e 0,4913 no aço

rugoso, 0,3979 e 0,4514 no concreto, 0,2993 e 0,3925 na madeira, 0,2118 e 0,2514 no aço liso, 0,2189 e 0,2307 no polietileno e 0,1504 e 0,1825 no alumínio, para teores de umidade variando entre 11,98 e 22,82% b.s.;

- na variedade Catuaí-Vermelho, os limites inferior e superior do coeficiente de atrito dinâmico com a parede foram de, respectivamente, 0,4350 e 0,4764 no aço rugoso, 0,3821 e 0,4407 no concreto, 0,2746 e 0,3782 na madeira, 0,1821 e 0,2418 no aço liso, 0,1814 e 0,2086 no polietileno e 0,1468 e 0,1754 no alumínio, para teores de umidade variando entre 11,98 e 22,82% b.s.;

- na variedade Conillon, os limites inferior e superior do ângulo de atrito estático com a parede foram de, respectivamente, 23,89 e 26,99 no aço rugoso, 19,93 e 22,19 no concreto, 16,08 e 21,75 na madeira, 10,87 e 15,74 no aço liso, 10,97 e 11,62 no polietileno e 8,33 e 10,56 no alumínio, para teores de umidade variando entre 13,10 e 25,91 % b.s.;

- na variedade Conillon, os limites inferior e superior do ângulo de atrito dinâmico com a parede foram de, respectivamente, 23,46 e 26,66 no aço rugoso, 19,58 e 21,40 no concreto, 15,32 e 18,23 na madeira, 9,79 e 14,40 no aço liso, 9,89 e 10,66 no polietileno e 8,03 e 10,17 no alumínio, para teores de umidade variando entre 13,10 e 25,91 % b.s.;

- na variedade Conillon, os limites inferior e superior do coeficiente de atrito estático com a parede foram de, respectivamente, 0,4429 e 0,5093 no aço rugoso, 0,3625 e 0,4079 no concreto, 0,2882 e 0,3989 na madeira, 0,1921 e 0,2818 no aço liso, 0,1939 e 0,2057 no polietileno e 0,1464 e 0,1864 no alumínio, para teores de umidade variando entre 13,10 e 25,91 % b.s.;

- na variedade Conillon, os limites inferior e superior do coeficiente de atrito dinâmico com a parede foram de, respectivamente, 0,4339 e 0,5021 no aço rugoso, 0,3557 e 0,3919 no concreto, 0,2739 e 0,3293 na madeira, 0,1725 e 0,2658 no aço liso, 0,1743 e 0,1882 no polietileno e 0,1411 e 0,1793 no alumínio, para teores de umidade variando entre 13,10 e 25,91 % b.s.;

- os resultados dos ângulos e coeficientes de atrito com a parede, obtidos pelos equipamentos considerados alternativos superestimam em até 80% àqueles determinados pelo equipamento de cisalhamento de Jenike, portanto, não é recomendada a utilização destes equipamentos para o projeto de silos;

- os ângulos instantâneos de atrito interno, de repouso e o efetivo ângulo de atrito interno dos grãos de café com pergaminhos de ambas as variedades

aumentaram linearmente com o incremento do teor de umidade dentro da faixa de umidade analisada;

- o ângulo de atrito interno é superior estatisticamente ao de repouso em praticamente todos os teores de umidade, para ambas variedades devido ao estado de tensões impostas;

- os resultados obtidos pelos equipamentos considerados alternativos, para as propriedades de atrito interno instantâneas, diferiram estatisticamente dos de Jenike em praticamente todos os teores de umidade, sendo o de arraste superior aos demais, chegando a apresentar valores que superestimam o de cisalhamento de Jenike na ordem de 22 e 7% para as variedades Catuaí-Vermelho e Conillon, respectivamente, em função das condições em que os testes são realizados;

- os ângulos de atrito interno e efetivo aumentam com o aumento do teor de umidade e do tempo de consolidação;

- a variedade Catuaí-Vermelho praticamente sofre influência semelhante do teor de umidade e do tempo de consolidação no ângulo de atrito interno e no efetivo ângulo de atrito interno, enquanto, para a variedade Conillon, o ângulo de atrito interno e o efetivo ângulo de atrito interno são mais influenciados pelo teor de umidade do que pelo tempo de consolidação;

- na variedade Conillon, os limites inferior e superior do ângulo de atrito interno foram de, respectivamente: 31,38 e 35,51 com zero hora, 31,86 e 36,36 com seis horas, 32,00 e 36,62 com 12 horas e 32,05 e 40,03 com 24 horas de consolidação, para teores de umidade variando entre 13,10 a 25,91% b.s.;

- na variedade Catuaí-Vermelho, os limites inferior e superior do ângulo de atrito interno foram de, respectivamente, 34,22 e 42,27 com zero hora, 34,52 e 42,31 com seis horas, 35,62 e 42,97 com 12 horas e 35,88 e 46,98 com 24 horas de consolidação, para teores de umidade variando entre 11,98 e 22,82% b.s.;

- na variedade Conillon, os limites inferior e superior do efetivo ângulo de atrito interno foram de, respectivamente, 32,16 e 38,40 com zero hora, 33,50 e 39,71 com seis horas, 33,46 e 40,94 com 12 horas e 34,31 e 44,65 com 24 horas de consolidação, para teores de umidade variando entre 13,10 e 25,91% b.s.;

- na variedade Catuaí-Vermelho, os limites inferior e superior do efetivo ângulo de atrito interno foram de, respectivamente, 36,76 e 43,88 com zero hora, 41,00 e 46,78 com seis horas, 41,39 e 46,85 com 12 horas e 41,52 e 49,59 com 24 horas de consolidação, para teores de umidade variando entre 11,98 e 22,82% b.s.;

- a propriedade física massa específica aparente das duas variedades aumenta linearmente com o incremento do teor de umidade, dentro da faixa de umidade analisada;

- a massa específica das duas variedades determinada pelo equipamento de cisalhamento de Jenike, por intermédio de sua célula de cisalhamento, difere estatisticamente dos obtidos pela balança de peso hectolítrico, em praticamente todos os teores de umidade, não sendo aconselhável à utilização desta propriedade determinada pelo equipamento de Jenike;

- os grãos de café de ambas espécies passam de fluxo livre para fluxo fácil com o aumento do teor de umidade e do tempo de consolidação; e

- a curva da função fluxo desloca-se para cima e aumenta sua inclinação com o aumento do tempo de consolidação e do teor de umidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO JÚNIOR, P.C. **Aspectos físicos, fisiológicos e de qualidade do café em função da secagem e do armazenamento**. Viçosa: UFV, 2001. 351p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2001.

AGRIANUAL 2003. **Anuário da agricultura brasileira**. São Paulo: FNP Consultoria & comércio Ltda., 2002. 536p.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO CAFÉ. Rio de Janeiro: **Coffee Business**, 2001-2002. 2002. 52p.

AS 3774 - Australian Standard – **Loads on bulk solids containers**. Sidney, 1996. 81p.

ATHIÉ, I.; CASTRO, M.F.P.M.; GOMES, R.A.R.; VALENTINI, S.R.T. **Conservação de grãos**. Campinas: Fundação Cargill, 1998. 236p.

AVIARA, N.A.; GWANDZANG, M.I.; HAQUE, M.A. Physical properties of gunga seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.73, n.2, p.105-111, 1999.

AYDIN, C. Physical properties of hazelnuts. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.81, n.3, p.297-303, 2002.

BALASUBRAMANIAN, D. Physical properties of raw cashew nut. **Journal of Agricultural Engineering Research**, New York, v.78, n.3, p.291-297, 2001.

BARRÊTO, R.L. **Determinação das propriedades físicas do corante e dos grãos de urucum (*Bixa orellana* L.) para elaboração de projeto de pressões e fluxo em silos**. Campina Grande: UFPB, 1997. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Paraíba, 87p.

BARYEH, E.A. Physical properties of bambara groundnuts. **Journal of Food Engineering**, London, v.47, n.4, p.321-326, 2001.

BARYEH, E.A. Physical properties of millet. **Journal of Food Engineering**, London, v.51, n.1, p.39-46, 2002.

BENEDETTI, B.C. **Influência do teor de umidade sobre as propriedades físicas de vários grãos**. Campinas: USP, 1987. 125p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade de São Paulo, 1987.

BERTOLINI, P.A.P.; AGUILAR, M. Problemas com o atual modelo de secagem e armazenamento de grãos. **Grãos Brasil**, Maringá, n.2, p.7-9, 2002.

BICKERT, W.G.; BUELOW, F.H. Kinetic friction of grains on surfaces. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.9, n.2, p.129-131, 1966.

BMHB - British Materials Handling Board. **Draft code of practice for the design of silos, bins, bunkers and hoppers**. Inglaterra, 1985. 101p.

BOUMANS, G. **Grain handling and storage**. Elsevier Science Publishers B.V., 1985. 436p.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: DNDV/CLAV, 1992. 365p.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.

BRUBAKER, J.E.; POS, J. Determining static coefficients of friction of grains on structural surfaces. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.8, n.1, p.53-55, 1965.

BUCKLIN, R.A.; THOMPSON, S.A.; ROSS, I.J.; BIGGS, R.H. Apparent dynamic coefficient of friction of wheat on galvanized steel bin wall material. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.36, n.6, p.1915-1918, 1993.

CAIXETA, G.Z.T. Gerenciamento da cafeicultura em época de crise. In: ZAMBOLIN, L. **Tecnologia de produção de café com qualidade**. Viçosa: UFV/DPF, 2001. p.1-24.

CALIL JÚNIOR, C. ARAÚJO, E.C.; NASCIMENTO, J.W. **Silos Metálicos Multicelulares**. São Carlos, USP, 1997, 178p.

CALIL JÚNIOR, C. **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais**. São Carlos, USP, 1990. 198p.

ÇARMAN, K. Some physical properties of lentil seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.63, n.1, p.87-92, 1996.

- CARVALHO, V.D.; CHAGAS, S.J.R.; SOUZA, S.M.C. Fatores que afetam a qualidade do café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.18, n.187, p.5-20, 1997.
- CHALFOUN, S.M.; CARVALHO, V.L. Efeito de microorganismos na qualidade da bebida do café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.18, n.187, p.21-26, 1997.
- CHANDRASEKAR, V.; VISWANATHAN, R. Physical and thermal properties of coffee. **Journal Agricultural Engineering Research**, New York, v.73, n.3, p.227-234, 1999.
- CLARK, R.L.; McFARLAND, A. Granular materials friction apparatus. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.16, n.6, p.1198-1199, 1973.
- CONAB. Safra 2002/2003 – 3<sup>o</sup> Levantamento. Disponível em [www.conab.gov.br/download/safra/safracafe.pdf](http://www.conab.gov.br/download/safra/safracafe.pdf). 02 set. 2003.
- CORRÊA, P.C.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; QUEIROZ, D.M.; SAMPAIO, C.P.; CARDOSO, J.B. Variação das dimensões características e da forma dos frutos de café durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.3, p.466-470, 2002.
- COUTO, M.S.; MAGALHÃES, A.C.; QUEIROZ, D.M.; BASTOS, I.T. Massa específica aparente e real e porosidade de grãos de café em função do teor de umidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.1, p.61-68, 1999.
- DALBELLO, O; OLIVEIRA, M.J.G.; BENEDETTI, B.C. Determinação do ângulo de taluda e coeficiente de atrito para amendoim (*Arachis hipogea* L.) e aveia preta (*Avena strigosa* L.) em diferentes teores de umidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 23, 1994, Campinas. **Resumos...** São Paulo: SBEA, 1994. 15p.
- DEL GIÚDICE, P.M. Unidades Armazenadoras. In: DEL GIÚDICE, P.M.; AZEVEDO, J.M.P. **Manuseio, secagem e armazenamento de café**. Viçosa: Minas Gerais, 1969. p.190-199.
- DIN 1055. Lastannahmen für Bauten, Blat 6: **Lasten in silozellen**. Alemanha, 1987. 12p.
- DUFFY, S.P.; PURI, V.M. Flowability parameters and flow functions for confectionery sugar and detergent powder at two moisture contents. **Applied Engineering in Agriculture**. v.12, n.5, p.601-606, 1996.
- DUFFY, S.P.; PURI, V.M. Measurement and comparison of flowability parameters of coated cottonseeds, shelled corn and soybeans at three moisture contents. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.42, n.5, p.1423-1427, 1999.

- DUTTA, S.K.; NEMA, V.K.; BHARDWAJ, R.K. Physical properties of gram. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.39, n.3, p.259-268, 1988.
- ESCHENWALD, A.; HALL, C.W. Coefficient of friction, angle of repose, specific gravity, and bulk density of coffee fruits and coffee beans. **Journal of agriculture of University of Puerto Rico**, v.45, n.1, p.19-25, 1961.
- EUROCODE 1. Basis of design and actions on structures, Part 4: **Actions on silos and tanks**, 1993. 40p.
- FERREIRA, A.B.H. O novo dicionário Aurélio – Século XX, 1999. CD Rom.
- FRASER, B.M.; VERMA, S.S.; MUIR, W.E. Some physical properties of fababeans. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.23, n.1, p.53-57, 1978.
- GAYLORD, E.D.; GAYLORD, C.N. **Desing of steel bins for storage of bulk solids**. New Jersey: Prentice-Hall, 1984. 359p.
- GHOSH, B.N. Effect of moisture content on the static coefficient of friction of parchment coffee beans. **Journal Agricultural Engineering Research**, New York, v.13, n.3, p.249-253, 1968.
- GODINHO, R.P.; VILLELA, E.R.; OLIVEIRA, G.A.; CHAGAS, S.J.R. Variações na cor e na composição química do café (*Coffea arabica* L.) armazenado em coco e beneficiado. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.especial, n.1, p.38-43, 2000.
- GOMES, F.C. **Estruturas de armazenamento** – Avanços tecnológicos na construção. Lavras, UFLA, 2001. 70p. (Apostila)
- GUMBE, L.O.; MAINA, C. Friction coefficient of cereal grains on various surfaces. **Agricultural mechanization in Asia, Africa and Latin America**, v.21, n.4. p.61-64, 1990.
- GUPTA, R.K.; DAS, S.K. Friction coefficients of sunflower seed and kernel on various structural surfaces. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.71, n.2, p.175-180, 1998.
- GUPTA, R.K.; DAS, S.K. Physical properties of sunflower seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.66, n.1, p.1-8, 1997.
- HAAKER, G.F.J.C.R. Progress in measuring bulk solid properties. In: Chisa Conferation 115. Prague, 1990. 10p.
- HAEBERLIN, I.B.; TEIXEIRA, E.C.; KAM-CHINGS, M.H.L. Análise do impacto do rompimento do acordo internacional do café sobre Brasil e Colômbia. **Revista Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v.31, p.9-22, 1993.

IRTWANGE, S.V.; IGBEKA, J.C. Selected moisture dependent friction properties of two african yam bean (*Sphenostygis stenocarpa*) accessions. **Applied Engineering in Agriculture**, v.18, n.5, p.559-565, 2002.

ISO 11697. Bases for designers of structures – Loads due bulk materials, 1995. 75p.

JAIN, R.K.; BAL, S. Properties of pearl millet. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.66, n.1, p.85-91, 1997.

JENIKE, A.W.; JOHANSON, J.R. **Flow factor tester and consolidating bench operating instructions**. Jenike & Johanson, Inc, North Billerica, Massachusetts – USA, 1979, 40p. (Manual Técnico)

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

JENIKE, A.W. **Storage and flow of solids**. Salt Lake City. University of Utah. Estados Unidos. 1980. 197p. (8ª Edição)

JHA, S.N. Physical and aerodynamic properties of makhana. . **Journal of food Process Engineering**, Connecticut, v.21, n.3, p.301-316, 1998.

JHA, S.N. Physical and hygroscopic properties of makhana. **Journal Agricultural Engineering Research**, New York, v.72, n.2, p.145-150, 1999.

JHA, S.N. Physical and termal properties of gorgon nut. **Journal of food Process Engineering**, Connecticut, v.16, n.2, p.237-245, 1993.

JORDÃO, B.A.; GARRUTI, R.S.; ANGELUCCI, E.; TANGO, J.S.; TOSELLO, Y. Armazenamento de café beneficiado a granel em silo com ventilação natural. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE PESQUISAS CAFEEIRAS, 2, 1974, Poços de Caldas. **Resumos...** Rio de Janeiro: MIC/IBC, 1974. p.385-386.

JOSHI, D.C.; DAS, S.K.; MUKHERJEE, R.K. Physical properties of pumpkin seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.54, n.3, p.219-229, 1993.

KALEEMULLAH, S. the effect of moisture content on the physical properties of groundnut kernels. **Tropical Science**, Lawrence, v.32, p.129-136, 1992.

KALEEMULLAH, S.; GUNASEKAR, J.J. Moisture-dependent physical properties of arecanut kernels. **Biosystems Engineering**, v.82, n.2, 331-338, 2002.

KAMATH, S.; PURI, V.M.; MANBECK, H.B. Flow property measurement using the Jenike cell for wheat flour at various moisture content and consolidation times. **Powder Technology**, Lausanne, v.81, n.3, p.293-297, 1994.

LAWTON, P.J. Coefficients of friction between cereal grain and various silo wall materials. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.25, n.1, p.75-86, 1980.

LIMA, A.L.; CAVALCANTI-MATA, M.E.R.M.; NASCIMENTO, J.W.B.; BRAGA, M.E.D. Estudo das características físicas do milho para dimensionamento de silos de fibra de vidro. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, v.5, n.2, p.171-184, 1997.

LOCURTO, G.J.; ZAKIROV, V.; BUCKLIN, R.A.; HANES, D.M.; TEIXEIRA, A.A.; WALTON, O.R.; ZHANG, X.; VU-QUOC, L. **Soybean friction properties**. St. Joseph: ASAE, 1997. 8p. (Paper 97-4108).

MATIELLO, J.B. **O café do cultivo ao consumo**. São Paulo: Editora Globo S.A., 1991. 320p.

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

MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.

MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Science, 1970. v.1, 734p.

NASCIMENTO, J.W.B. **Estudo dos silos metálicos prismáticos para fabrica de rações**. São Carlos: EESC/USP, 1996. 152p. (Tese de Doutorado).

NASCIMENTO, J.W.B.; SILVA, V.R.; MACIEL, K.R.D. Caracterização das propriedades de fluxo do feijão mulatinho (*Phaseolus vulgaris* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31, 2002, Salvador. **Resumos...** Salvador: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2002a. CD Rom.

NASCIMENTO, J.W.B.; SILVA, V.R.; MACIEL, K.R.D. Caracterização do feijão preto (*Phaseolus vulgaris* L.) para predição do fluxo e projeto de silos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31, 2002, Salvador. **Resumos...** Salvador: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2002b. CD Rom.

NASCIMENTO, J.W.B.; SILVA, V.R.; MACIEL, K.R.D. Propriedades de fluxo de flocos de milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30, 2001, Foz do Iguaçu. **Resumos...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001a. CD Rom.

NASCIMENTO, J.W.B.; SILVA, V.R.; MACIEL, K.R.D. Propriedades de fluxo de feijão macassar (*Vigna unguiculata*) para predição do fluxo e projeto de silos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30, 2001, Foz do Iguaçu. **Resumos...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001b. CD Rom.

NIMKAR, P.M.; CHATTOPADHYAY, P.K. Some physical properties of green gram. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.80, n.2, p.183-189, 2001.

NOGUEIRA, V.S.; TEIXEIRA, A.A.; PARAIZO, L.F. Efeitos de diversos tipos de tulas sobre a qualidade do café. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE PESQUISAS CAFEIRAS, 9, 1981, São Lourenço. **Resumos...** Rio de Janeiro: MIC/IBC, 1981. p.368-374.

OCTAVIANI, J.C. **Secagem de café cereja descascado desmucilado com utilização de gás liqüefeito de petróleo.** Campinas: UNICAMP, 2000. 101p. (Tese de Mestrado).

OJE, K.; UGBOR, E.C. Some physical properties of oilbean seed. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.52, n.4, p.305-313, 1991.

OLAJIDE, O.J.; ADE-OMOWAYE, O. Some physical properties of locust bean seed. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.74, n.3, p.213-215, 1999.

OLAOYE, J.O. Some physical properties of castor nut relevant to the design of processing equipment. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.77, n.1, p.113-118, 2000.

RAVENET, J. **Silos: teoria, investigacion, construccion.** Barcelona: Editores Tecnicos Asociados S.A., 1977. 381p.

RAVENET, J. **Teoria, investigacion e construccion.** Editores Asociados, 1983. 270p.

REED, A.R.; ARNOLD, P.C. Comparative techniques for measuring the flow properties of cement. In: PARTICULATE AND MULTIPHASE PROCESSES, 1987, Miami Beach. **Resumos...** Washington, DC: Hemisphere Publ. Corp., 1987.

REIMBERT, M.L.; REIMBERT, A.M. **Silos: Theory and Practice.** London: Olympia Translation Service, 1976. 252p.

RICHTER, D.W. Friction coefficients of some agricultural materials. **Agricultural Engineering**, v.35, n.5, 411-413, 1954.

SCHWEDES, J. Measurement of flow properties of bulk solids. **In: Proceedings International Symposium of Powder Technology 81**, 1981. p.89-98.

SCHWEDES, J. Measurement of flow properties of bulk solids. **Powder Technology**, Lausanne, v.88, n.2, p.285-290, 1996.

SHEPHERD, H.; BHARDWAJ, R.K. Moisture dependent physical properties of pigeon pea. **Journal Agricultural Engineering Research**, New York, v.35, n.4, p.227-234, 1986.

SILVA, J.S.; BERBERT, P.A. **Colheita, secagem e armazenamento de café.** Viçosa: Aprenda Fácil, 1999. 146p.

SILVA, J.S.; CORRÊA, P.C. Estrutura, composição e propriedades dos grãos. In: SILVA, J.S. **Secagem e armazenamento de produtos agrícolas**. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 2000. p.21-37.

SILVA, J.S.; LOPES, R.P.; DONZELES, S.M.L.; MACHADO, M.C. Custo e gerenciamento da secagem de café em sistemas combinados. In: ZAMBOLIM, L. **Tecnologias para produção de café com qualidade**. Visconde do Rio Branco: Suprema Gráfica e Editora Ltda, 2001. p.475-526.

SINGH, K.K.; GOSWAMI, T.K. Physical properties of cumin seed. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.64, n.2, p.96-98, 1996.

SNYDER, L.H.; ROLLER, W.L.; HALL, G.E. Coefficients of kinetic friction of wheat on various metal surfaces. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.10, n.3, p.411-413, 1967.

SOUZA, S.M.C.; CARVALHO, V.D. Classificação de propriedades e municípios cafeeiros da região sul do estado de Minas Gerais, quanto a estruturas e procedimentos, visando à preservação da qualidade do café. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.22, n.4, p.435-443, 1998.

STEWART, B.R.; HOSSAIN, Q.A.; KUNZE, O.R. Friction coefficients of sorghum grain on steel Teflon and concrete surfaces. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.12, n.4, p.415-418, 1969.

SUTHAR, S.H.; DAS, S.K. Some physical properties of karingda [*Citrullus lanatus* (Thumb) Mansf] seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.65, n.1, p.15-22, 1996.

TEIXEIRA, A.A.; AZEVEDO, A.M.G.; SEELSCHOPP, J.; STEIN, N.; GORFF, R. Armazenamento de café em silos metálicos com circulação de ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE PESQUISAS CAFEEIRAS, 10, 1983, Poços de Caldas. **Resumos...** Rio de Janeiro: MIC/IBC, 1983. p.249-254.

TEUNOU, E.; FITZPATRICK, J.J. Effect of storage time and consolidation on food powder flowability. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v.43, n.2, p.97-101, 2000.

TEUNOU, E.; FITZPATRICK, J.J.; SYNNOTT, E.C. Characterisation of food powder flowability. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v.39, n.1, p.31-37, 1999.

THOMAZIELLO, R.A.; FAZOULI, L.C.; PEZZADANE, J.R.M.; FAHL, J.I.; CARELLI, M.L.C. **Café arábica: cultura e técnicas de produção**. Campinas, Instituto Agrônômico, 2000. 82p. (Boletim Técnico 187)

THOMPSON, S.A.; BUCKLIN, R.A., BATICH, C.D. ROSS, I.J. Variation in the apparent coefficient of friction of wheat on galvanized steel. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.31, n.6, p.1518-1524, 1988.

TOSELLO, A. Equipamento experimental para determinação de coeficiente de atrito de grãos; atrito interno e atrito com paredes de diversos materiais; em conjugação com o equipamento Instron Universal. **Suplemento de Ciência e Cultura**, São Paulo, v.27, n.7, p.491-491, 1975.

TSANG-MUI-CHUNG, M.; VERMA, L.R., WRIGHT, M.E. A device for friction measurement of grains. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.27, n.4, p.1938-1941, 1984.

VIEIRA, G. Análise da viabilidade técnica e econômica de armazenagem, a granel, de café beneficiado em silo metálico modular. Viçosa: UFV, 2001. 136p. (Tese de Doutorado).

VISWANATHAN,R.; PALANISAMY,P.T.; GOTHANDAPANIL,L.; SREENARAYANAN, V.V. Physical properties of neem nut. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.63, n.1, p.19-26, 1996.

ZOU, Y.; BRUSEWITZ, G.H. Angle of internal and cohesion of consolidated ground marigold petals. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.44, n.5, p.1255-1259, 2001.

## APÊNDICE

## APENDICE A

### ANÁLISE ESTATÍSTICA COMPARANDO OS DIFERENTES TAMANHOS DE CÉLULA DE CISALHAMENTO DE JENIKE

Quadro da Análise de Variância

Causas da Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob. F
Célula	2	0,8780505	0,4390252	0,3532	0,71072
Resíduo	24	29,8356310	1,2431513		
Total	26	30,7136815			

Média geral = 40,808887

Coefficiente de variação = 2,732%.

Teste de Tukey para Médias

Nº Ordem	Nº Tratam.	Nome	Nº Repet.	Médias	Médias Originais	5 %	1 %
1	2	Viçosa Grande	9	41,063331	41,063331	a	A
2	1	Viçosa Pequena	9	40,696669	40,696669	a	A
3	3	São Carlos Grande	9	40,666667	40,666667	a	A

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si, ao nível de significância indicado.

D.M.S. 5% = 1,31194 – D.M.S. 1% = 1,69103.

Observa-se, que não existe diferença estatística significativa entre os dois tamanhos de células de cisalhamento analisados.