

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE
PRODUTOS ARMAZENADOS PARA PROJETO
DE PRESSÕES E FLUXO EM SILOS

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ADHEMAR PITELLI MILANI

São Carlos, abril de 1993.

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE
PRODUTOS ARMAZENADOS PARA PROJETO
DE PRESSÕES E FLUXO EM SILOS

ADHEMAR PITELLI MILANI

Tese apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São
Paulo, como parte dos requisitos neces-
sários à obtenção do título de "Doutor"
em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Carlito Calil Junior

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Carlito Calil Junior
Prof. Dr. Tetuo Hara
Prof. Dr. Dilermando Perecin
Prof. Dr. Sergio Persival Baroncini Proença
Prof. Dr. Orencio Monje Vilar

Suplentes:

Prof. Dr. Fernando da Costa Baeta
Prof. Dr. Jorge de Lucas Junior
Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr
Prof. Dr. José Samuel Giongo

São Carlos, abril de 1993.

Aos meus pais,

Adhemar e Maria Aparecida

Aos meus irmãos,

Caetano Paschoal

José Ricardo

Paulo José

Maria Silvia

DEDICO

A minha esposa,

Tania

Aos meus filhos,

Adhemar

Milene

OPEREÇO

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Carlito Calil Junior, pelo apoio, orientação e amizade;

Ao Prof. Dr. Dilermando Perecin, pela contribuição nas análises estatísticas deste trabalho e amizade;

A Comissão Examinadora;

Aos colegas do Departamento de Engenharia Rural, pelo apoio, incentivo e amizade;

Ao Sr. Silvio Antonio Ferro, pela realização dos ensaios de laboratório deste trabalho;

Ao Sr. Davi Aparecido Trevizolli, pelo processamento de dados em microcomputador e serviços de datilografia;

A Sra. Izilda Maria de Carvalho Máximo, pelos desenhos realizados neste trabalho;

A Sra. Mirian Rosângela Ignácio Flório e Aléssio Manoel de Simoni, pelos serviços de datilografia;

Aos funcionários do Laboratório de Madeiras (LAMEN) e da Secretaria da Seção de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos-USP, pela atenção e amizade;

A Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) e à Coordenação do PICD-UNESP, pela Bolsa de Estudos concedida;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq - PADCT, pelo auxílio na realização deste trabalho;

E a todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo principal de contribuir com o desenvolvimento da norma nacional específica para o projeto e construção de silos, definindo-se uma metodologia para a determinação das propriedades de produtos armazenados, com base em estudos teóricos e experimentais.

Teóricos: considerações para projeto e construção de silos; teorias, métodos e aparelhos para determinação das propriedades de produtos armazenados; métodos para determinação das propriedades de produtos armazenados com a utilização do "aparelho de cisalhamento de Jenike".

Experimentais: determinação de metodologia de ensaio para dois tipos de produtos (granular e pulverulento), através da utilização da máquina de ensaio TSG 70-140, conhecida a nível internacional como "Jenike Shear Cell", com

a finalidade da adoção dos parâmetros necessários para o cálculo, pelo método semi-probabilístico, das ações e fluxo de produtos armazenados em estruturas de armazenamento.

Os resultados obtidos permitiram a proposta de uma metodologia para a caracterização das propriedades de novos produtos granulares e pulverulentos.

SUMMARY

This work was developed aiming to contribute, mainly with the development of the specific national norm for designing and building up silos, by defining the methodology for the determination of bulk solids proprieties, based on theoretic and experimental studies.

Theoretical: considerations for designing and building-up silos; theories, methods and devices for determining the bulk solids proprieties through the utilization of the Jenike shear device.

Experimental: determination of test methodology for two types of products (granular and pulverulent), through the utilization of TSG 70-140 test machine, known internationally as "Jenike Shear Cell", aiming the adoption of the necessary parameters for calculations, through the semi-probabilistic method, the actions and bulk solids flow in storing structures.

The obtained results allowed the proposal of a methodology for the characterization of proprieties of new granular and pulverulent products.

SUMÁRIO

Página

1. INTRODUÇÃO	1
2. NOMENCLATURA UTILIZADA	6
2.1. Glossário	6
2.2. Simbologia	8
3. CONSIDERAÇÕES PARA PROJETO E CONSTRUÇÕES DE SILOS ..	12
3.1. Fluxo e Cargas em Silos	12
3.1.1. Fluxo em silos	12
3.1.2. Cargas em silos	16
3.2. Teoria, Métodos e Aparelhos para Determinação das Propriedades de Produtos Armazenados em Silos	19
3.2.1. Produto armazenado e lugar geométrico .	19
3.2.2. Aparelhos de cisalhamento	30
3.2.2.1. Aparelhos de cisalhamento direto com deslocamento de translação	37
3.2.2.2. Aparelhos de cisalhamento direto com deslocamento de rotação	39
3.2.2.3. Aparelhos de cisalhamento indireto ..	42
3.2.2.4. Comparação entre os aparelhos de ci- salhamento	46
4. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE PRODUTOS ARMAZENA- DOS	55
4.1. Aparelho de Cisalhamento de Jenike	56
4.2. Princípio do Teste de Cisalhamento	58

4.3. Descrição das Determinações das Propriedades de Produtos Armazenados com a Utilização do Aparelho de Cisalhamento de Jenike	76
4.3.1. Teste de cisalhamento instantâneo	76
4.3.2. Teste de cisalhamento com tempo de consolidação	108
4.3.3. Técnica do teste de cisalhamento de atrito com a parede	116
4.4. Testes dos Produtos Armazenados	129
4.4.1. Máquina de ensaio (TRANSLATION SHEAR TESTER TSG 70-140)	129
4.4.2. Ensaios	132
4.4.2.1. Materiais utilizados nos ensaios	132
4.4.2.2. Tratamento estatístico	133
4.4.2.3. Determinação dos ensaios	134
4.4.2.3.1. Granulometria	134
4.4.2.3.2. Umidade	134
4.4.2.3.3. Compressibilidade	135
4.4.2.3.4. Estado estável	139
4.4.2.3.5. Teste de cisalhamento instantâneo .	141
4.4.2.3.6. Teste de cisalhamento com tempo de consolidação	144
4.4.2.3.7. Teste de cisalhamento de atrito com a parede instantâneo	147
4.4.2.3.8. Teste de cisalhamento de atrito com a parede com tempo de consolidação.	149

4.4.3. Definição do número de repetições necessários para a realização dos ensaios dos produtos farinha de trigo e colza .	151
4.4.4. Análise comparativa dos resultados obtidos nos testes com critérios adotados nos trabalhos citados no item 4 (Determinação das Propriedades de Produtos Armazenados)	152
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	153
5.1. Teste de Granulometria	153
5.2. Teste de Umidade	154
5.3. Teste de Compressibilidade	155
5.4. Teste de Estado Estável	162
5.5. Teste de Cisalhamento Instantâneo	179
5.6. Teste de Cisalhamento com Tempo de Consolidação	214
5.7. Teste de Cisalhamento de Atrito com a Parede Instantâneo	222
5.8. Teste de Cisalhamento de Atrito com a Parede com Tempo de Consolidação	244
5.9. Número de Repetições dos Testes dos Produtos Farinha de Trigo e Colza	252
5.10. Análise Comparativa dos Resultados Obtidos com os Critérios Utilizados nos Trabalhos Citados no Item 4 (Determinação das Propriedades dos Produtos Armazenados)	254
6. CONCLUSÕES E METODOLOGIA PROPOSTA	260

	Página
6.1. Conclusões	260
6.2. Metodologia Proposta Para Determinação das Propriedades de Produtos Armazenados com Equi- pamento de Cisalhamento por Translação, conhe- cido como "Jenike Shear Cell"	261
7. PERSPECTIVAS PARA NOVAS PESQUISAS	268
8. LITERATURA CITADA	269

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, assim como muitos países do mundo, ainda tem problemas com armazenamento de produtos agrícolas e outros, tendo grandes perdas devido à ineficiência da capacidade de armazenagem ou a utilização de técnica inadequada de armazenamento.

A necessidade de aumentar a capacidade de armazenamento 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.

JENIKE & JOHANSON (1968) relata que os primeiros grandes silos foram construídos em 1860 para o armazenamento de grãos. Desde então, milhares de grandes e pequenos silos têm sido construídos para o armazenamento de uma extensa variedade de pós, grãos, torrões, fibras, etc., os quais serão chamados de "produtos armazenados".

Os silos são estruturas difíceis de projetar com

relação a fluxos contínuos e como estruturas econômicas e seguras, devido aos materiais particulares a serem armazenados terem propriedades diferentes daquelas dos líquidos e dos sólidos.

Os projetistas iniciantes pensavam que os produtos armazenados comportavam-se como líquidos. Experimentos sobre modelos e silos (JENIKE & JOHANSON, 1968) mostraram que as pressões nas paredes não aumentavam linearmente com a profundidade, mas que parte do peso do produto era transferido às paredes pelo atrito. Como resultado, o fundo e as paredes na parte baixa do silo têm pressões menores do que poderiam ter com líquido, simultaneamente, as paredes estão dentro de compressão vertical a qual é ausente no líquido.

Hoje em dia, sabe-se que quando consideramos o fluxo de produtos sólidos, o seu comportamento não é similar ao líquido. De fato, as propriedades dos produtos armazenados e líquidos diferem tanto que os mecanismos nos dois casos são totalmente diferentes, e como principais diferenças pode-se citar:

- Produtos armazenados podem transferir tensões de cisalhamento sob condições estáticas e o líquido não;

- Muitos produtos quando consolidados possuem resistência de coesão e guardam a sua forma sob pressão, ao passo que os líquidos formam superfícies niveladas;

- As tensões de cisalhamento que ocorrem no

produto armazenado fluindo ou em deformação lenta, podem usualmente, serem consideradas independentes da taxa de cisalhamento e dependentes sobre o modo da pressão atuarem dentro do produto. Em um líquido, a situação é ao contrário; as tensões são dependentes da taxa de cisalhamento e independentes do modo de pressão.

Problemas em projetos de silos começaram a ser amplamente discutidos depois de 1930, quando novos materiais de construção e métodos de projetos estruturais conduziram a redução dos fatores de segurança. O número de colapsos estruturais continuavam e estimulavam novas investigações sobre as pressões que o produto exerce sobre a estrutura contida. Estas ruínas têm conduzido vários países no mundo, durante os últimos 25 anos (CALIL JR., 1990), a desenvolver normas específicas para projeto e construção de silos; dentre os quais ressaltam: França (SNBATI-1975); Canadá (CFBC-1983); Estados Unidos (ACI-1983); Grã-Bretanha (BMHB-1985); Austrália (NCSE-1986); Alemanha (DIN 1055-1987); URSS (SNIP 2.10.05.85, apud DZIENDIEL et al. 1988 e USHITSKII e VAN'KOV 1989) e FIP/ISO (européia em execução).

A finalidade de uma especificação de cargas é fornecer condições para projeto de estruturas de silos seguras e econômicas. Para uma estrutura ser 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 pelo conhecimento dos tipos e modos possíveis de ruínas que nela possam ocorrer.

Na ação geral do manuseio de produtos armazenados nos silos, é essencial que os movimentos de entrada e saída de materiais, sejam feitos sob uma maneira efetiva e eficiente. Problemas que comumente ocorrem na operação de silos de armazenamento, reduzem a sua capacidade abaixo dos valores especificados. Na maioria dos casos, os problemas que ocorrem na prática, são devidos a concepção de projetos inadequados juntos com a falta de conhecimento das relevantes propriedades do fluxo de produtos armazenados.

Nos últimos anos, significantes progressos têm sido feitos no desenvolvimento de teorias associadas ao uso analítico para descrever o comportamento do produto armazenado, sob a variedade de estados que são encontrados nas operações de manuseio.

CALIL JR. (1990) comenta que após estudos das principais normas internacionais, verificou que:

- existe uma grande discrepância entre os critérios adotados entre as normas, e que as maiores ocorrem com relação às propriedades físicas dos produtos armazenados;
- as estimativas de cargas em silos são basicamente apoiadas em duas teorias: a de Janssen (1895) para estimativas de cargas iniciais ou de carregamento no silo; e a

teoria de Jenike (1968, 1973) para estimativas de cargas de fluxos em silo, com fluxo de massa e funil.

No que diz respeito ao Brasil, não existe uma norma específica de silos que possa orientar projetos e profissionais ligados a essa área. Encontra-se em fase de estudos uma proposta (CALIL JR., 1990).

Este trabalho tem o objetivo principal de contribuir com o desenvolvimento da norma nacional específica para projeto e construção de silos, definindo uma metodologia para a determinação das propriedades de produtos armazenados (granulares e pulverulentos), com a finalidade da adoção dos parâmetros necessários para o cálculo, pelo método semi-probabilístico, das ações e fluxo de produtos armazenados em estruturas de armazenamento.

2. NOMENCLATURA UTILIZADA

2.1. Glossário

- ângulo de repouso: o máximo ângulo do talude do produto medido com a horizontal;
- compactação (consolidação): processo de redução do volume por aplicação de tensões;
- consolidação crítica: um produto está consolidado criticamente em relação à tensão normal aplicada, quando ele desliza sem mudanças na densidade e em estado de tensão constante;
- sobreconsolidação: um produto está sobreconsolidado em relação à tensão normal aplicada, quando o deslizamento é acompanhado por um aumento da densidade e a tensão aumenta diretamente até um máximo e depois diminui;
- subconsolidação: um produto está subconsolidado em relação à tensão normal aplicada, quando o deslizamento é acompanhado

- por um aumento da densidade e da tensão cisalhante;
- canal de fluxo: canal é aquela parte da massa do produto que ocorre fluxo quando a boca de descarga é aberta ou acionado o alimentador;
 - função fluxo: gráfico da resistência ao deslizamento inconfinado versus tensão principal máxima para um produto específico;
 - fluxo de massa: tipo de fluxo na tremonha ou no silo caracterizado pela ausência de zonas de produtos estacionários, isto é, todo o produto incluindo aquele adjacente à parede, está em movimento quando o silo é descarregado;
 - fluxo de funil: tipo de fluxo na tremonha ou no silo caracterizado pela ocorrência de fluxo confinado à uma região central acima da boca de descarga enquanto que o produto adjacente às paredes permanece estacionário. Esta zona central tem a forma de um funil e se estende até o topo ou intercepta a parede do silo em algum ponto acima da tremonha;
 - deslizamento (Y): deformação plástica do produto;
 - deformação plástica (ou fluxo): deformação irreversível quando se retira a tensão;
 - tensão principal: tensão normal atuando no plano onde não existe tensão de cisalhamento;
 - círculo de Mohr de tensões: representação gráfica do estado de tensões nos eixos de tensão normal e cisalhamento, isto é, plano $\sigma \times \tau$;
- shear: (cisalhamento) medição real das tensões de cisalhamento,

com os valores dos níveis de tensões normais, para o deslizamento do produto;

pré-shear: (pré-cisalhamento) formação de uma zona de cisalhamento no produto, com tensões normais e de cisalhamento em fluxo de estado estável;

TSG 70-140 - manual da máquina (OPERATING INSTRUCTIONS FOR THE TRANSLATIONAL SHEAR TESTER TSG 70-140);

SSTT - manual SSTT (STANDARD SHEAR TESTING TECHNIQUE), trabalho desenvolvido pela Federação Européia de Engenharia Química WPMS-1991 (WORKING PARTY THE MECHANICS OF PARTICULATE SOLIDS);

BMHB - norma inglesa (1985);

JENIKE & JOHANSON (1979) - Instruções de operações do aparelho de fator de fluxo e da bancada de consolidação (Flow Factor Tester And Consolidating Bench Operating Instructions).

2.2. Simbologia

YL (IYL) - lugar geométrico de deslizamento instantâneo do produto (lugar geométrico): curva da tensão de cisalhamento versus tensão normal. Esta curva é quase sempre uma linha reta, resultando em um ângulo constante de atrito interno.

EYL - efetivo lugar geométrico de deslizamento (efetivo lugar geométrico): lugar geométrico que passa através da origem do plano $\sigma \times \tau$ e é tangente ao círculo de Mohr em estado estável durante fluxo contínuo.

- TYL - lugar geométrico de deslizamento com tempo de consolidação (lugar geométrico de tempo): o lugar geométrico de um produto que permaneceu em repouso durante um certo tempo sob tensão normal;
- WYL - lugar geométrico de deslizamento instantâneo com a parede (lugar geométrico da parede): gráfico da tensão de cisalhamento com a parede pela tensão normal. É na maioria das vezes uma linha reta.
- TWYL - lugar geométrico de deslizamento com a parede com tempo de consolidação (lugar geométrico da parede de tempo): lugar geométrico da parede que permaneceu em repouso durante um certo tempo sob tensão normal;
- ϕ - ângulo de atrito interno: inclinação do lugar geométrico (YL);
- ϕ_e - ângulo do efetivo lugar geométrico de deslizamento (efetivo ângulo de atrito): inclinação do efetivo lugar geométrico de deslizamento (EYL) como especificado por Jenike;
- ϕ_t - ângulo de atrito interno com tempo de consolidação (ângulo de atrito de tempo): inclinação do lugar geométrico de deslizamento com tempo de consolidação (TYL);
- ϕ_w - ângulo de atrito com a parede (ângulo de atrito da parede): tangente do coeficiente de atrito com a parede;
- ϕ_{wt} - ângulo de atrito com a parede com tempo de consolidação (ângulo de atrito da parede de tempo);
- μ - coeficiente de atrito com a parede: a relação entre a

tensão de cisalhamento na parede com a tensão normal na parede obtidos no lugar geométrico de deslizamento com a parede (WYL);

σ_m - tensão máxima de consolidação: tensão máxima de consolidação utilizada para obtenção da "consolidação crítica" com fluxo de estado estável;

σ_1 - tensão principal máxima: tensão normal máxima principal representada pelo círculo de Mohr de tensões. É o valor máximo do ponto de intersecção do círculo de Mohr com o eixo das tensões normais;

σ - tensão normal;

τ - tensão de cisalhamento;

f_c - resistência ao deslizamento inconfinado (resistência inconfined): tensão principal máxima do círculo de Mohr de tensões sendo tangente ao lugar geométrico de deslizamento com a mínima tensão principal igual a zero. Um sinônimo para a resistência a compressão;

C - coesão: resistência ao deslizamento do produto onde a tensão normal é igual a zero;

γ - peso específico do produto (densidade);

K - razão entre as pressões horizontal e vertical;

R - raio hidráulico: razão entre a área interna da seção transversal do silo e seu perímetro interno;

F_v - força vertical;

F_s - força de cisalhamento;

F_n - força normal;

- σ_s - tensão normal de cisalhamento (tensão normal de shear);
- σ_p - tensão normal de pré-cisalhamento (tensão normal de pré-shear);
- σ_w - tensão normal da parede;
- τ_s - tensão de cisalhamento (shear);
- τ_p - tensão de pré-cisalhamento (pré-shear);
- τ_w - tensão de cisalhamento da parede;
- W_t - peso total da célula de cisalhamento com o produto (daN);
- W_b - peso da base do anel (daN);
- W_r - peso do anel de cisalhamento (daN);
- W_l - peso da tampa (daN);
- H - peso do pendural de cargas (daN);
- V_t - volume total da célula de cisalhamento (m^3);
- V_r - volume do anel de cisalhamento (m^3);
- A - área da seção transversal da célula (m^2);
- g - valor da constante gravitacional ($g = 9,81$);
- F_{Sp} - força de cisalhamento de pré-shear/estado estável (daN);
- F_{Ss} - força de cisalhamento de shear/deslizamento (daN);
- W_p - carga sobre o pendural de pesos no pré-shear (daN);
- W_s - carga sobre o pendural de pesos no shear (daN);
- W_{wt} - peso total da amostra de parede incluindo anel de cisalhamento, tampa e produto armazenado (daN);
- W_m - peso da amostra de material da parede (daN);
- W_w - carga sobre o pendural de pesos do teste de atrito (daN);
- F_{Sw} - força de cisalhamento registrada (daN);
- D - diâmetro das partículas (mm);

3. CONSIDERAÇÕES PARA PROJETO E CONSTRUÇÕES DE SILOS

3.1. Fluxo e Cargas em Silos

3.1.1. Fluxo em silos

No projeto de silos para fluxo por gravidade e equipamentos relacionados, uma enorme quantidade de métodos, códigos e fatores devem ser considerados. Em primeiro lugar, é essencial que as propriedades do fluxo de produtos armazenados possam ser determinadas seguramente e alcance as condições de operações esperadas.

Segundo CALIL JR. (1990), o tipo de fluxo determina as características de descarga do produto armazenado, o tipo de segregação, a formação ou não de material sem movimento e se o silo pode ser esvaziado completamente. Também, determina a distribuição de pressões nas paredes e fundação, e

a integridade e custo da construção. 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.

SCHWEDES (1983) faz considerações indicadas na Figura (01) que ilustra um gráfico adotado na revisão da norma alemã (DIN-1055) parte 6, para projeto estrutural de silos. Como pode ser visto, uma distinção é feita entre o fluxo de massa e o de funil. No fluxo de massa, todo produto armazenado começa a fluir após a abertura da boca de saída. O fluxo de funil, para os três tipos de células apresentadas, têm uma zona em repouso onde o produto armazenado não flui. A diferença entre os fluxos são determinadas pela geometria do silo e propriedades de fluxo do produto armazenado.

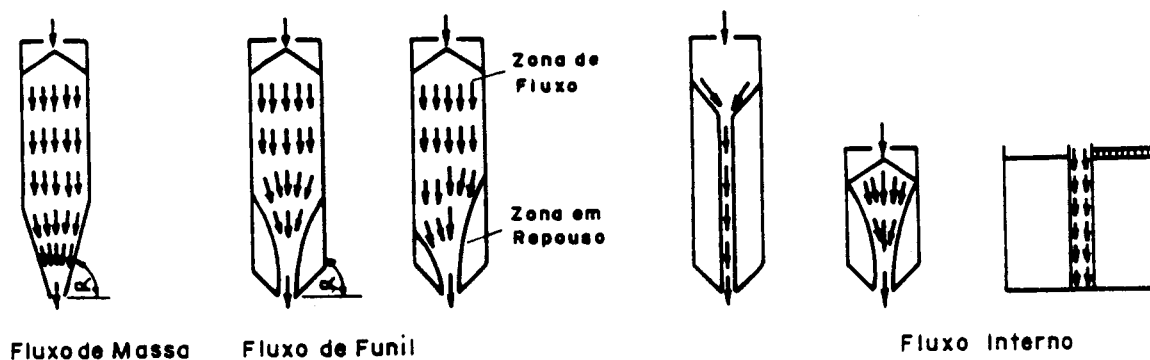


FIGURA 01. Modelos de fluxos.

CALIL JR. (1990) relata que o objetivo principal no projeto de silos de armazenamento de fluxo por gravidade é garantir que o produto armazenado flua sem ocorrências de obstruções, destacando os dois principais tipos de obstruções de fluxo - arco coesivo e tubo (Figura 02).

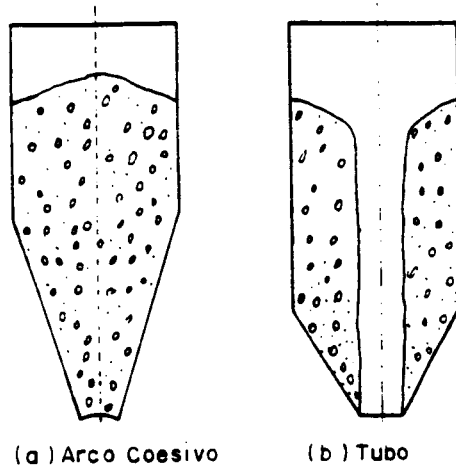


Figura 02. Tipos de obstruções de fluxo.

Para formação de um arco estável ou tubo, o produto armazenado adquire, dentro do contorno da célula, resistência suficiente para suportá-lo. A resistência é em função do grau de consolidação; um produto "fofo" não tem resistência, mas a adquire sob compressão. A relação entre resistência inconfina versus tensão principal máxima é referida como função fluxo (Figura 03).

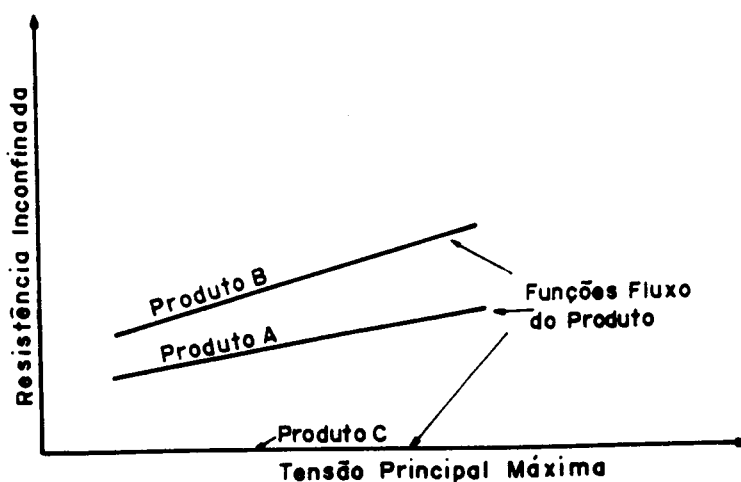


Figura 03. Resistência inconfinada versus tensão principal máxima.

O objetivo do projeto de silos quer por fluxo de massa ou funil, é determinar o ângulo de inclinação da tremonha e a dimensão da abertura de descarga, prevenindo a formação de arcos ou tubos estáveis.

As normas internacionais, de uma maneira geral, apresentam basicamente dois gráficos para predição do tipo de fluxo que irá ocorrer no silo, Figura 04 (gráficos adotados pela norma européia FIP/ISO, em execução, conforme CALIL JR., 1992). Estes gráficos fornecem o tipo de fluxo em função do coeficiente de atrito com a parede, a inclinação das paredes da tremonha e o seu tipo.

Baseados nas propriedades de fluxo, podem ser determinados os parâmetros geométricos do silo para se obter o fluxo desejado. A escolha do modelo de fluxo, geometria do silo e as propriedades do fluxo apropriadas permitem o cálculo das

taxas de fluxo e das ações sobre as paredes.

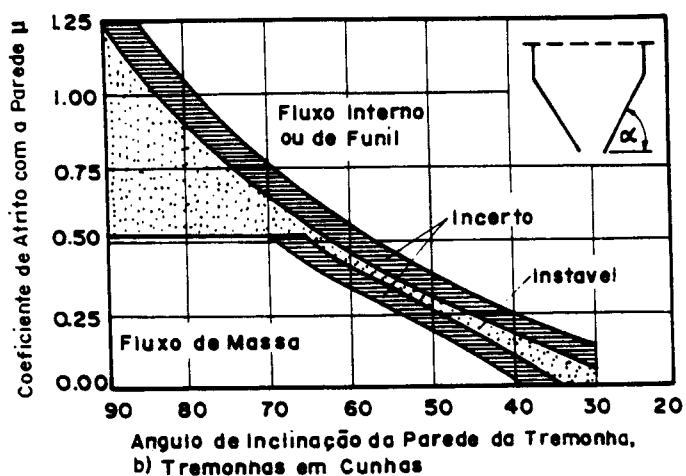
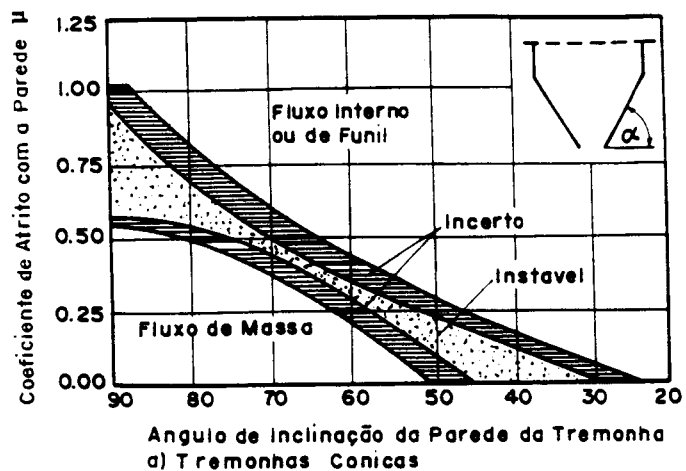


Figura 04. Determinação gráfica do tipo de fluxo.

3.1.2. Cargas em silos

A estimativa das cargas nas paredes dos silos tem sido objeto de pesquisa por muitos anos e estudos intensivos nessa área ainda continuam. Apesar de existir uma variedade muito grande de soluções aproximadas para o problema, uma coisa é certa: as cargas exercidas nas paredes dos silos sob

condições de operações são diretamente relacionadas com o tipo de fluxo que aparece no silo.

Segundo CALIL JR. (1990), as pressões nos silos devidas ao produto armazenado são variáveis temporariamente e espacialmente. Durante o seu tempo de uso, o silo é solicitado por uma série de ciclos: carga - armazena e descarga, que produz distribuição de pressões nas paredes dependentes do tempo (Figura 05). Em geral a pressão na parede P é função de três conjuntos de parâmetros:

$$P = P(S, G, M)$$

onde:

S = as propriedades do produto armazenado;

G = as propriedades geométricas e estruturais do silo;

M = modo de operação.

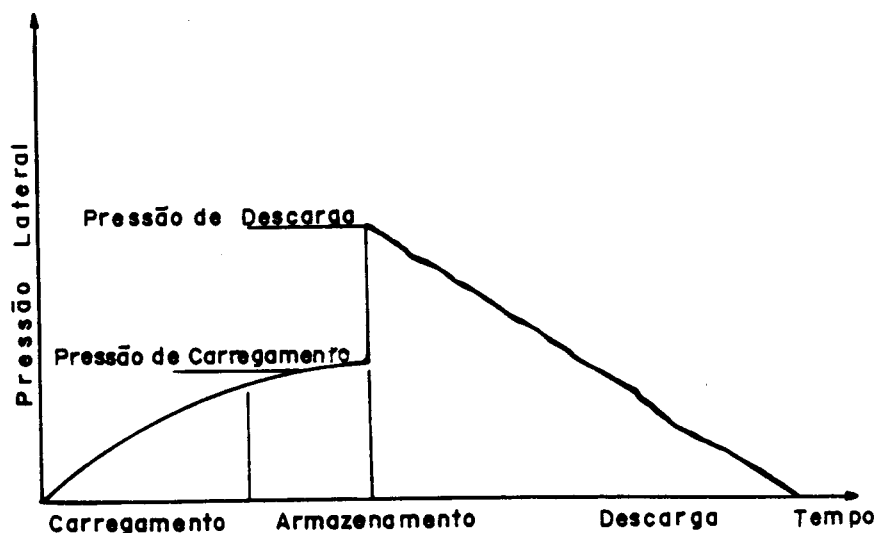


Figura 05. Perfil de carga na parede do silo para um ciclo típico.

Relata que não existe modelo analítico para as pressões nas paredes do silo que inclua todos os parâmetros relevantes. Os modelos existentes podem somente levar em consideração um limitado número de fatores sob restritas condições, os quais são apresentados no Quadro 01, assinalados com asterisco.

QUADRO 01. Apresenta os fatores que afetam a predição de pressão nas paredes do silo.

Propriedades de Produtos Armazenados (S)	Propriedades dos Silos (G)	Modos de Operação (M)
- Densidade	- Altura de Carga*	- Vazão da carga
- Ângulo de atrito interno*	- Forma da seção transversal*	- Vazão da descarga
- Ângulo de atrito com a parede*	- Geometria da descarga	- Método de promover o fluxo
- Forma, dimensão da partícula e distribuição	- Obstruções internas	- Método de carregamento
- Resistência elástica e cisalhamento	- Rigidez na parede	- Método de descarregamento
- Coesão	- Rugosidade das paredes	- Excentricidade de carregamento
- Consolidação		- Excentricidade de descarregamento
- Umidade		
- Temperatura		

Após estudos comparativos das principais normas internacionais existentes constatou que, existem muitas diferenças entre elas, e que o único ponto comum é a utilização da equação de Janssen para o cálculo das pressões de carregamento, o que não implica que as normas apresentam as mesmas pressões de carregamento para um particular produto a armazenar, pois a equação de Janssen é função de quatro variáveis, sendo três dependentes do produto a armazenar: densidade (γ), coeficiente de atrito com a parede (μ) e a razão entre pressões horizontal e vertical (k); e uma dependente da

geometria do silo que é o raio hidráulico (R). Para ilustração, é apresentado a seguir, as fórmulas utilizadas segundo a norma DIN 1055 (1987), para o estado de carregamento:

- Pressões horizontais:

$$Phf(z) = \frac{\gamma R}{\mu} \left(1 - e^{-\frac{\mu K}{R} z} \right)$$

- Pressões verticais:

$$Pvf(z) = \frac{\gamma R}{\mu K} \left(1 - e^{-\frac{\mu K}{R} z} \right)$$

- Pressões de atrito por m² de superfície de parede:

$$Pwf(z) = \gamma R \left(1 - e^{-\frac{\mu K}{R} z} \right)$$

Nota-se, portanto, a importância do conhecimento das propriedades dos produtos armazenados.

3.2. Teoria, Métodos e Aparelhos para Determinação das Propriedades de Produtos Armazenados em Silos

3.2.1. Produto Armazenado e Lugar Geométrico

Conforme CALIL JR. (1990) um produto armazenado em um recipiente 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 do seu limite elástico.

Consideremos o elemento de produto armazenado em um silo mostrado na Figura 06. σ_1 e σ_2 são respectivamente, a maior e a menor tensão principal e são indicadas pelo semicírculo de Mohr da Figura 06-a. Se o elemento para esta condição de consolidação é cisalhado sob várias cargas normais, então é obtido o lugar geométrico de deslizamento da Figura 06-b. O semicírculo de Mohr, através da origem, define a tensão de deslizamento inconfínada f_c , que representa a resistência do material em uma superfície livre. Estendendo o lugar geométrico para interceptar o eixo τ , é definida a coesão aparente C . O ângulo ϕ é o ângulo de atrito interno. A coesão C é a tensão de cisalhamento sob tensão normal nula e, mesmo sendo uma propriedade do produto armazenado, ela normalmente não é usada na teoria de fluxo em silos.

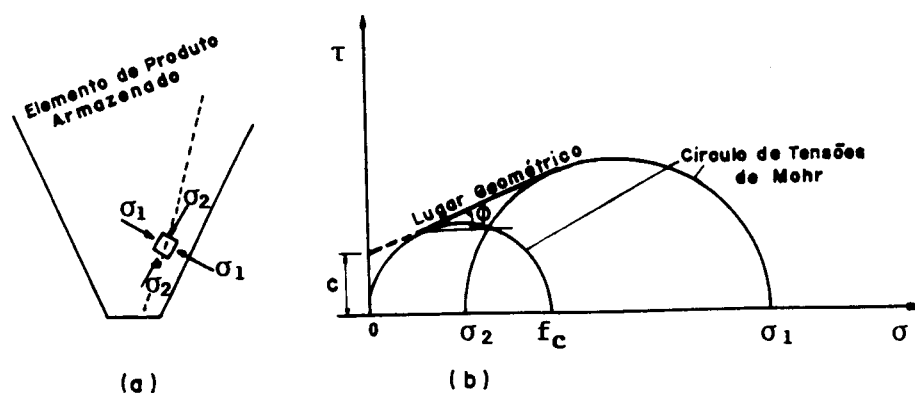


Figura 06. Lugar geométrico de deslizamento do produto armazenado.

Segundo JENIKE (1964), os produtos armazenados apresentam propriedades elasto-plástica e viscosas; porém, informações suficientes podem ser obtidas de uma análise baseada na suposição de que produtos armazenados se comportam como um modelo rígido-plástico do tipo Coulomb.

O conceito do sólido de Coulomb rígido-plástico modificado pode ser descrito como a seguir: o sólido rígido-plástico é aquele para o qual existe um limite na função de tensões, tal que tensões menores que aquelas determinadas pela função não causam deformação, enquanto que as tensões iguais às tensões limites causam ruptura ou fluxo plástico. Condições de tensões superiores a tensão limite não são permitidas.

Chamando a tensão de cisalhamento de τ e tensão normal de σ , e usando o sistema de coordenadas $\sigma \times \tau$, o limite da função de tensões é representado por um lugar geométrico YL. Para o sólido de Coulomb, o lugar geométrico é uma linha reta, inclinada por um ângulo de atrito ϕ com o eixo σ e interceptando o eixo τ no valor igual a C, a qual é chamado de coesão do sólido (Figura 07).

No sistema de coordenadas ($\sigma \times \tau$) qualquer condição de tensões pode ser representado por um semi-círculo de Mohr. Um sólido de Coulomb, rígido plástico, permanece rígido para tensões representados pelo semi-círculo de Mohr A, situado abaixo do lugar geométrico; e deformado para tensões determinadas por um semi-círculo de Mohr A' tangente ao lugar geométrico. Tensões correspondendo a um semi-círculo de Mohr,

cruzando o lugar geométrico, não são permitidas.

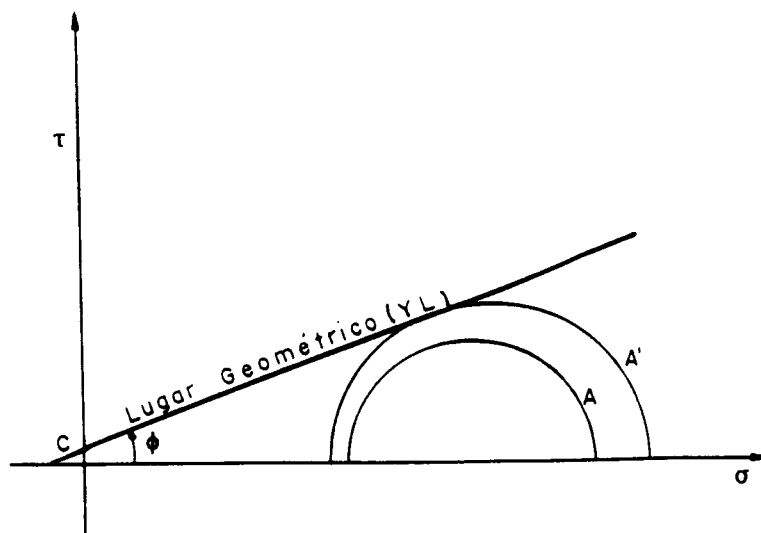


Figura 07. Lugar geométrico do sólido de Coulomb.

Observando-se o comportamento dos produtos armazenados, conclui-se que os conceitos de Coulomb devem ser alterados nos seguintes aspectos (JENIKE, 1964):

a. Para pequenos valores de tensão normal σ_1 , os lugares desviam significativamente da linha reta. A forma provável do lugar geométrico YL é mostrada na Figura 08;

b. O lugar geométrico não é estendido indefinidamente com o aumento de σ , e termina no ponto E (limite do estado estável);

c. A posição do lugar geométrico não é constante mas é uma função do grau de consolidação do produto. O não consolidado, produto armazenado solto não tem resistência e seu lugar geométrico reduz a um ponto na origem O. Com o crescimento da consolidação (e densidade), o lugar geométrico se desloca

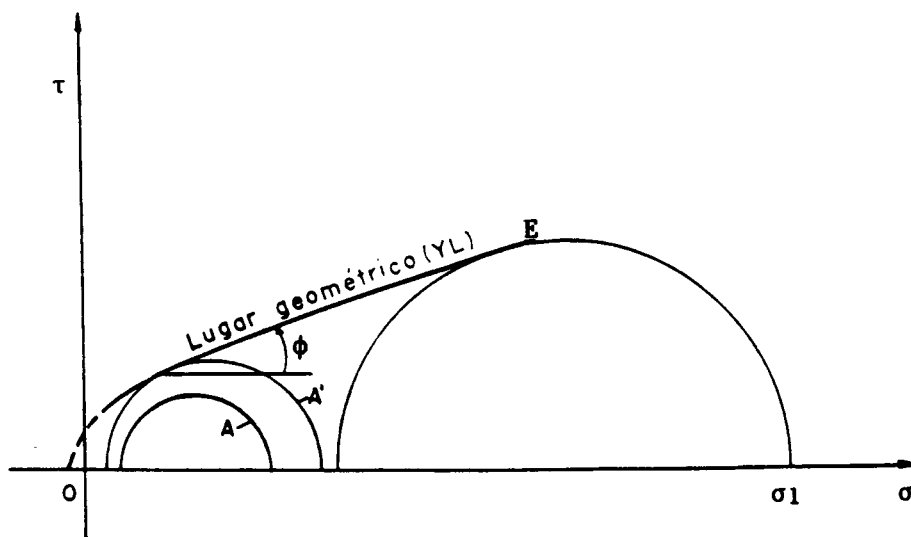


Figura 08. Lugar geométrico de produtos armazenados.

Geralmente, a forma do lugar geométrico de um dado produto armazenado é função não somente de sua densidade, mas também, da posição relativa de suas partículas e do método de consolidação que pode afetar a forma e a posição do lugar geométrico.

O significado do lugar geométrico pode ser explicado como a seguir: o lugar geométrico da Figura 08, foi determinado de um estado de consolidação medido por cisalhamento a uma tensão máxima σ_1 . O semi-círculo de Mohr através de σ_1 e tangencial ao lugar geométrico determina e termina no ponto E do lugar. O produto armazenado é rígido para todas condições de tensões representado pelo semi-círculo de Mohr A, que não atinge o lugar geométrico. Quando condições

de tensões A mudam para A' tocando ao lugar geométrico, o produto desliza, a densidade diminui, o lugar geométrico reduz rapidamente até assumir a forma correspondente às novas tensões, das quais estabelecem um novo grau de consolidação. A condição de tensão determinado pelo semi-círculo de Mohr A' é de breve duração e ao novo estado de consolidação corresponde no diagrama novo lugar geométrico.

O salto é máximo quando o semi-círculo de Mohr A aproxima-se aos lugares geométricos de baixos valores de σ . Conforme vai ocorrendo esta aproximação, o lugar geométrico atinge seu ponto final e esta proximidade termina no ponto E, a magnitude do salto diminui, até que em E não exista salto, mas uma condição de fluxo plástico contínuo. Durante as condições de fluxo, as pressões devem permanecer estáveis e o produto então flue em cisalhamento puro sem variar a densidade e o lugar geométrico. Quando as pressões aumentam continuamente, a consolidação cresce e a densidade do produto e o lugar geométrico aumentam. Quando as pressões diminuem as situações são invertidas.

Um produto armazenado pode também romper a tração. Isto é referido como uma ruptura frágil. No diagrama de deslizamento é representado por um semi-círculo de tensões aproximando ao lugar geométrico em $\tau = 0$. O lado tracionado do lugar geométrico é mostrado em uma escala maior na Figura 09.

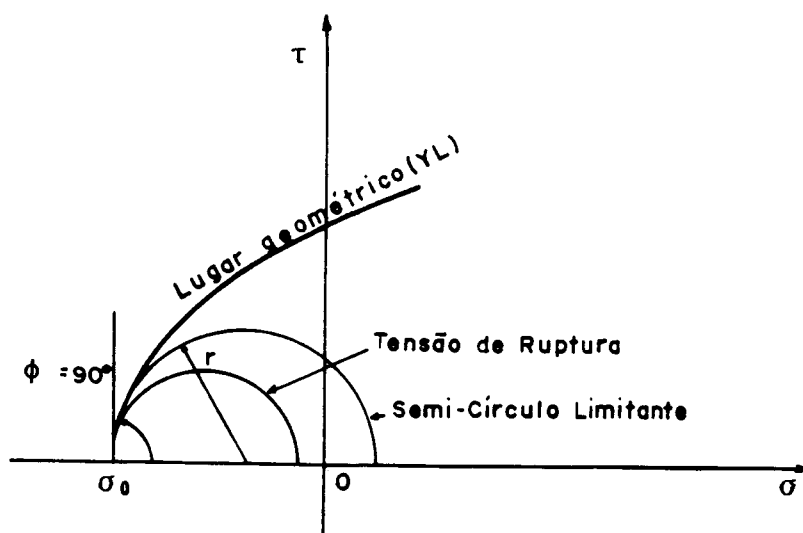


Figura 09. Ruptura na tensão de tração.

O limite entre a ruptura à tração e por cisalhamento é definido pelo semi-círculo que tem a curvatura $1/r$ do lugar geométrico no ponto $(\sigma_0, 0)$. Todas as condições de tensões representadas pelos semi-círculos contidos dentro do semi-círculo limitante aproximam ao lugar geométrico no ponto $(\sigma_0, 0)$ e causam ruptura de tração. Deve ser notado que para $\tau = 0$, o ângulo de atrito ϕ do lugar geométrico precisa ser igual a 90° para garantir que τ seja maior que zero e a ruptura à tração possa ocorrer para uma outra tensão sem ser a hidrostática.

Além disso, se o ângulo ϕ for menor do que 90° para $\tau = 0$, como é mostrado na Figura 10, logo o produto poderá ser estável para uma tração hidrostática σ_h , mas poderá romper

se a tração for reduzida para valores mostrados pelo semicírculo de Mohr. Isto é contrário a experiência e, portanto, poderá parecer que ϕ é igual a 90° para $\tau = 0$ para todos os lugares geométricos que interceptam com o eixo τ estando acima de zero.

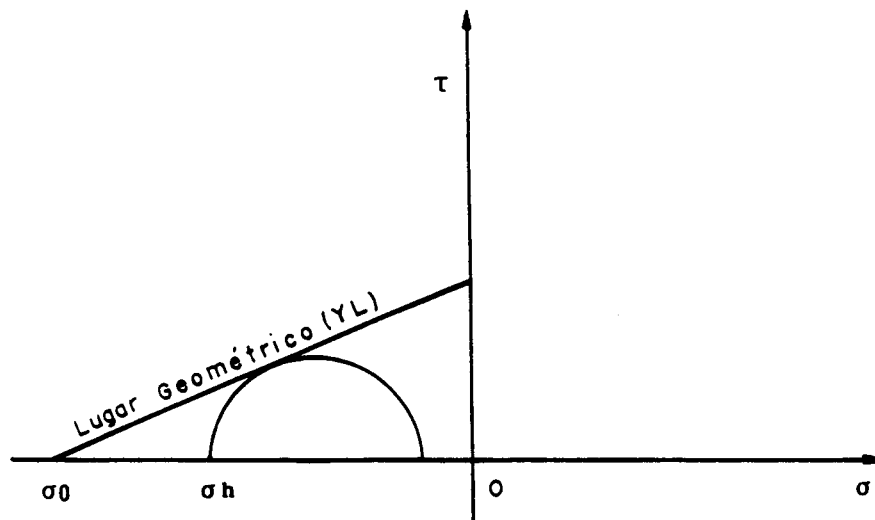


Figura 10. Forma pouco provável do lugar geométrico.

No produto armazenado, um elemento fluído sob condições de fluxo contínuo, consolida novamente abaixo da pressão predominante. Os lugares geométricos e as propriedades dos fluxos medidos que representam estas condições são chamados de "Lugares Geométricos Instantâneos" IYL, e de propriedades de fluxo instantâneos.

Um produto armazenado fluído em canais deixa de fluir, fica sob ação predominante da pressão estática e sob esta condição, o produto ganha resistência com o intervalo de

tempo. Quando o fluxo é retardado e deve ser restituído, a pressão incipiente necessária para superar aos poucos a resistência de deslizamento é mais alta do que aquela durante o fluxo contínuo. Se estas pressões mais altas não acontecerem, não ocorre o aumento de fluxo. O lugar geométrico e as propriedades do fluxo obtidas para um produto que foi consolidado por um período de tempo, são chamados "Lugar Geométrico de Tempo" TYL (Figura 11), e de "Propriedades de Fluxo de Tempo". A intensidade com que o lugar geométrico de tempo aumenta, sobre o fluxo contínuo ou do lugar geométrico instantâneo, depende do produto.

Segundo SCHWEDES (1983), a maioria das considerações de fluxo de produtos são baseados na hipótese que eles se comportem como um contínuo. No encontro de Erlangen em 1974, pela primeira vez, Molerus introduziu uma teoria que considera uma conexão entre a análise das partículas e mecânica do contínuo. Com considerações voltadas a expandir e melhorar sua teoria de fluxo de materiais coesivos, Molerus (1975), fez considerações a respeito de interações entre partículas. Para obter deslocamento entre partículas, o fluxo do produto, atrito e adesão devem ser conhecidos. Adesão é dependente da pressão previamente introduzida entre as partículas. É obvio que a história da tensão em repouso para materiais coesivos tem influência no limite de deslizamento devido a coesão dos produtos se alterar com o tempo de armazenamento.

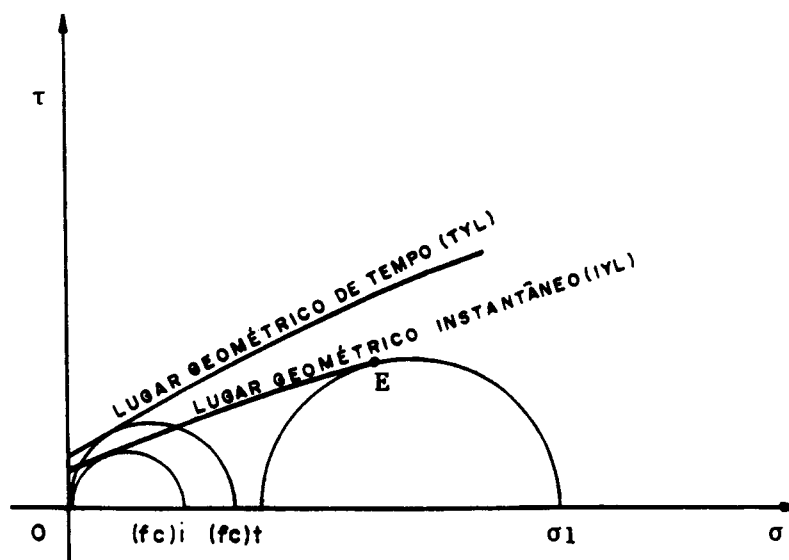


Figura 11. Efeito do tempo.

Os limites de deslizamento de produtos são determinados com aparelhos de cisalhamento e plotados em um diagrama σ , τ (σ = tensão normal e τ = tensão de cisalhamento) mostrado na Figura 12. Esse parâmetro limite de deslizamento, chamado de lugar geométrico de deslizamento, é função da densidade (γ). Esta densidade depende da história da tensão, que pode por exemplo, ser representada pela maior tensão de consolidação σ_1 do círculo de tensões, sendo tangente ao ponto final do lugar geométrico. Um produto armazenado, tendo esta densidade, começará a fluir quando o círculo de tensões, representando o estado de tensões aplicado é tangente ao lugar geométrico. Se ele é tangente pelo lado esquerdo do ponto final (círculo de tensão tracejado), o deslizamento ocorrerá

conjuntamente com a dilatação do produto. Um novo lugar geométrico localizado mais abaixo torna-se efetivo com a história da tensão mudar com o deslizamento. A dilatação ocorre e pára quando alcança o ponto final do mais baixo lugar geométrico. Neste ocorre fluxo no estado estável com volume constante.

O fluxo de estado estável ocorre devido à ruptura dos contactos das partículas e da adesão interna por forças externas. Usando esta consideração, Molerus pode desenvolver uma relação física perfeita para o fluxo de estado estável. Em acordo com a nomenclatura de Jenike, Molerus usou o termo efetivo lugar geométrico, que descreve o fluxo de estado estável de Jenike. Contrário a Jenike, o lugar geométrico de fluxo de estado estável usado por Molerus intercepta o eixo τ , onde o efetivo lugar geométrico de Jenike sempre passa pela origem.

Jenike introduziu seu efetivo lugar geométrico com uma linha reta tangente ao círculo de tensões do fluxo de estado estável e passando através da origem das coordenadas.

Por esta definição, o fluxo de estado estável pode ser descrito por uma simples propriedade do produto, o ângulo ϕ_e (Figura 12). Consequentemente evita colocar um significado físico do ângulo ϕ_e . Contudo, como um significado pode ser visto no ângulo ϕ_{st} por Molerus, com sua derivação baseada em condições físicas.

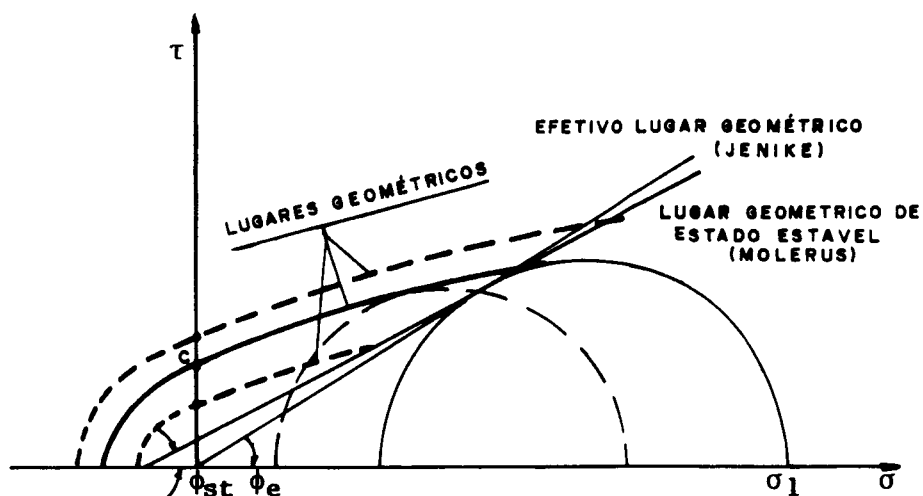


Figura 12. Lugar geométrico, efetivo lugar geométrico, lugar geométrico de estado estável.

A interceptação individual de cada lugar geométrico em τ , conduz a uma coesão com a resistência ao cisalhamento uma carga normal zero. Como antes, a posição do lugar geométrico e a coesão é dependente da história da tensão. A interseção do lugar geométrico de estado estável ao eixo τ descreve a coesão de um estado não consolidado. Para materiais não coesivos os lugares geométricos de Molerus e Jenike coincidem em uma linha.

3.2.2. Aparelhos de Cisalhamento

Os aparelhos apropriados para medir as propriedades de fluxo são os de cisalhamento, nos quais o

produto é conduzido ao cisalhamento nele mesmo ou ao longo de uma parede sob condições específicas.

SCHWEDES (1983) comenta que, quando os engenheiros de processo começaram a determinar as propriedades de fluxo dos produtos por aparelhos de cisalhamento, eles foram conduzidos a utilizar os usados no campo da mecânica dos solos, onde duas razões justificavam que esses dispositivos não poderiam ser utilizados sem modificação. Primeira: as pressões que ocorrem na mecânica dos solos, frequentemente, excedem aquelas de interesse para o projeto de silos. Segunda: o engenheiro civil estuda as tensões aplicadas para um material abaixo do limite de deslizamento, onde um engenheiro de processo, usualmente, quer obter fluxo. Entretanto, para resolver seus problemas práticos, um engenheiro de mecânica dos solos só precisa da posição aproximada do limite de deslizamento, portanto, o critério de fluxo Mohr-Coulomb com ou sem a interceptação do eixo é adequado.

Durante a última década, tem sido intensa a pesquisa para encontrar aparelhos de cisalhamento ou fixar princípios aprovados para os problemas em engenharia de processos. A Figura 13 dá uma visão dos possíveis princípios de cisalhamento e os nomes de alguns aparelhos, distinguidos como cisalhamento direto e indireto.

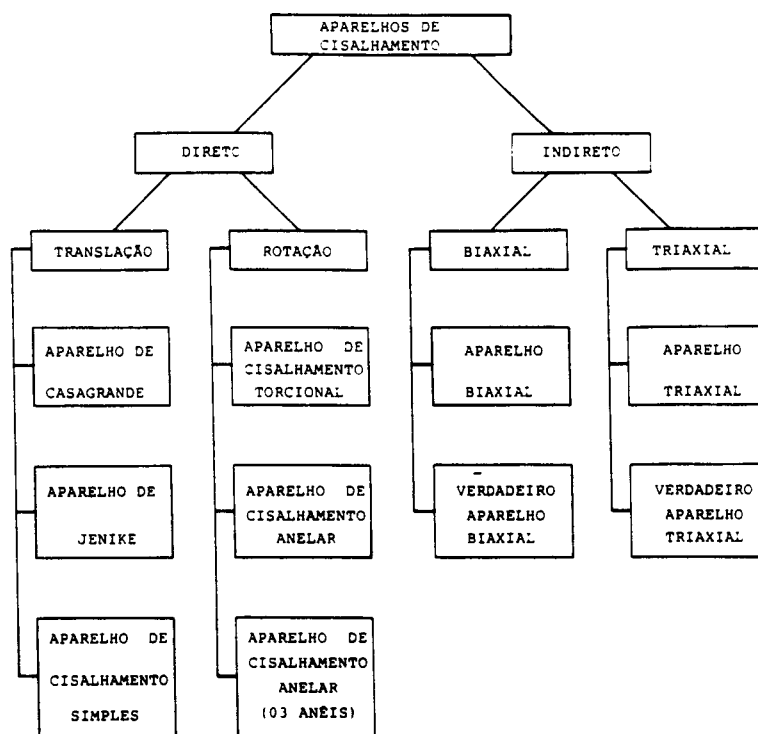


Figura 13. Aparelhos de cisalhamento.

SCHWEDES (1981) num estudo para poder analisar diferentes testes de cisalhamento, explica o significado do deslizamento dos produtos armazenados com auxílio do aparelho de cisalhamento de Jenike (Figura 14). A célula de cisalhamento é composta de uma base, um anel e uma tampa. Base e anel são enchidos com produtos armazenados. Uma força vertical F_v (F_N) é aplicada sobre a tampa, enquanto uma força de cisalhamento horizontal F_s é aplicada em um suporte anexo a tampa.

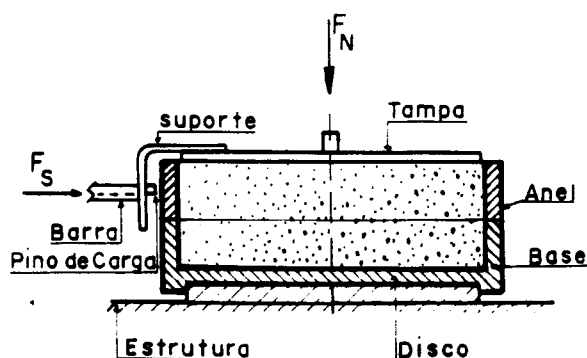


Figura 14. Célula de cisalhamento de Jenike.

Iniciando os testes de cisalhamento com amostras de produtos de mesma densidade inicial sob diferentes forças normais F_N , os valores de F_N e F_S máximos pertencem a um limite de deslizamento do produto armazenado. Com a distribuição das forças na seção transversal A da célula, as tensões normais e cisalhamento são obtidas e plotadas no gráfico σ , τ . Parâmetros do limite do deslizamento, denominado lugar geométrico, corresponde a uma densidade inicial do produto. Com o aumento da densidade do produto, o correspondente lugar geométrico poderá situar como mostrado na Figura 15.

Todo lugar geométrico tem um ponto final (E) e o significado disto é que o produto armazenado tenha alcançado um estado de tensões de deslizamento em estado estável, sem qualquer nova mudança nas tensões e no volume. Desde que não haja mudanças de volume das amostras, elas alcançam o lugar geométrico no ponto final, sendo chamado de "Consolidação

Crítica". Realizando testes de cisalhamento com amostras de produto de mesma densidade inicial mas abaixo da tensão normal, a amostra deve ser compactada durante o teste de cisalhamento.

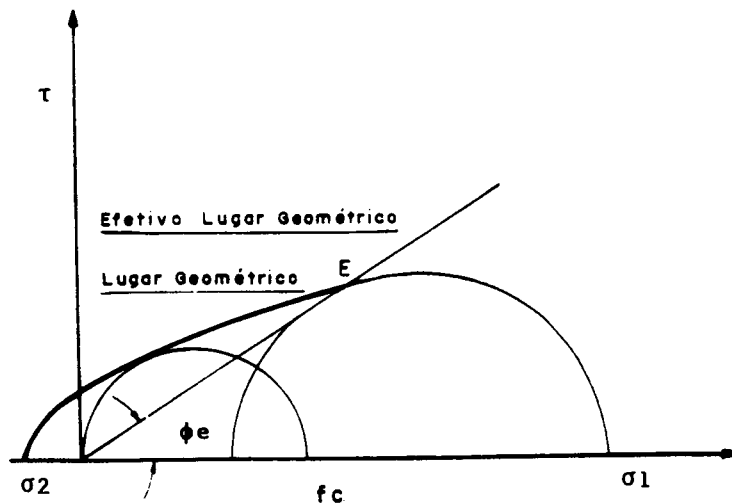


Figura 15. Lugares geométricos.

Isto leva o produto a um ponto de fluxo de estado estável de um lugar geométrico tendo uma densidade mais alta. Com respeito à tensão normal durante o teste, esta amostra foi "consolidada". Conseqüentemente, amostras são sobreconsolidadas se elas começam a dilatar quando alcançam o limite de deslizamento. Testes com estas amostras determinam pontos ulteriores de um lugar geométrico. As curvas, força de cisalhamento F_s e mudança de volume ΔV (positiva para uma diminuição de volume), versus a força de cisalhamento são mostradas na Figura 16, para os estados de consolidação mencionados acima (Figura 16); (a) corresponde a uma amostra

com consolidação crítica sem mudança de volume sob uma força de cisalhamento constante quando em escoamento. Cisalhamento em amostras subconsolidadas (caso b) o aumento relativo da força de cisalhamento reduz-se depois a uma parte linear. Isto é, uma linha com redução no volume até chegar a um fluxo de estado estável e uma densidade mais alta é obtida. Amostra sobreconsolidada no cisalhamento (caso c) ao atingir o limite geométrico fica dilatada. Dilatação que significa uma diminuição na densidade do produto e resistência. Portanto, a força de cisalhamento necessária para o deslizamento diminui até alcançar outra vez um fluxo de estado estável.

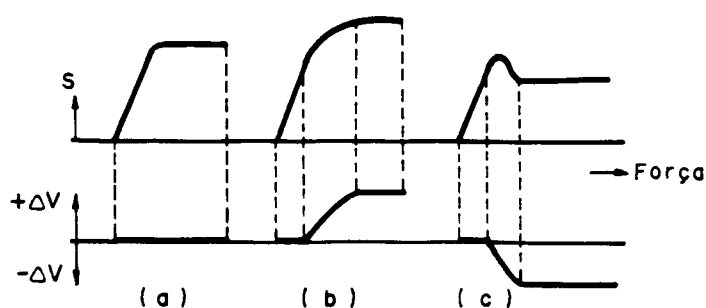


Figura 16. Estados de consolidação.

Dois características do círculo de tensões de Mohr com tensões principais máximas σ_1 e f_c são marcadas na Figura 15. O círculo com σ_1 representa fluxo de estado estável e f_c é a resistência compressiva (resistência inconfined) da amostra do produto de mesma densidade. A relação σ_1/f_c é depois usada para caracterizar a fluxibilidade dos produtos armazenados. A linha reta com o ângulo de inclinação não é

tangencial somente ao círculo de Mohr de fluxo de estado estável deste lugar geométrico, mas também, equivale aproximadamente aos círculos de Mohr de outros lugares geométricos. Esta linha chama-se efetivo lugar geométrico, representando o fluxo de estado estável em diferentes densidades e ϕ_e é a medida do efetivo ângulo de atrito interno no fluxo de estado estável.

O lugar geométrico (Figura 15) é o limite de deslizamento do produto armazenado coesivo. Com coesão nula ($c = 0$) a influência da densidade do produto sobre o limite do deslizamento é pequena. Os lugares geométricos individuais terminam juntos. Na mecânica dos sólidos é comum representar todos os lugares geométricos por uma única linha, a qual para produtos armazenados menos coesivos também é idêntica com o efetivo lugar geométrico. Na mecânica dos sólidos, esta linha é chamada de linha de Coulomb.

Os testes de cisalhamento são realizados com aparelhos distinguidos de cisalhamento direto e indireto. 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. Nos ensaios de cisalhamento direto as direções das tensões principais giram durante o processo de cisalhamento.

3.2.2.1. Aparelhos de cisalhamento direto com deslocamento de translação

É possível produzir outros planos de cisalhamento para o deslocamento de rotação ou translação. Para o cisalhamento direto de uma amostra dois casos ideais podem ser distinguidos, conforme mostrados na Figura 17 "a" o caso de atrito - Coulomb puro sem mudança de volume, "b" é um processo de cisalhamento, onde o cisalhamento é uniforme na amostra, com possibilidade de mudanças de volume. O processo de cisalhamento do teste de Jenike é mostrado no caso "c" para comparação. Dentro da lentiforme zona de cisalhamento, o caso "b" é quase realizado; fora desta zona o material é movimentado como no caso "a".

O aparelho de cisalhamento equivalente ao de Jenike na mecânica dos solos é o tipo Casagrande. Contrário ao aparelho de Jenike, ele tem uma seção transversal quadrada. Na sua forma original ele era força-controlada, ao passo que o aparelho de Jenike e o novo aparelho de Casagrande são de deformações controladas.

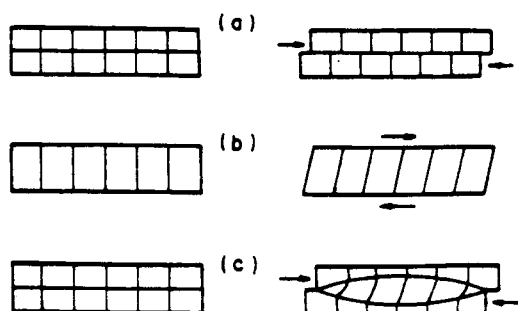


Figura 17. Planos de cisalhamento.

Os aparelhos de cisalhamento de Jenike e Casagrande tem duas principais desvantagens:

- Eles assumem que um plano de deslizamento coincide com o plano horizontal. Isto não pode ser demonstrado nestes testes;

- Medidas de tensões são indeterminadas durante o ensaio.

O aparelho de cisalhamento em que um estado de tensão pode ser determinado completamente é o aparelho de cisalhamento simples, mostrado na Figura 18. A amostra é comprimida pela força normal F_N , ao passo que a força de cisalhamento F_S atua sobre o suporte do aparelho. Com as leituras das células de cargas (1 - 8 completas) pode-se determinar as tensões do círculo de Mohr. O lugar geométrico no gráfico σ, τ é obtido com a envoltória do círculo de Mohr da maior tensão.

Testes comparativos foram conduzidos em vários lugares, com o mesmo produto armazenado, usando os aparelhos de cisalhamento simples e de Jenike. Os resultados mostraram que a suposição da coincidência dos planos horizontal e de deslizamento não é correta, mas tem pouca influência no projeto de uma tremonha destinada ao armazenamento de produtos.

A desvantagem do aparelho de cisalhamento simples é a elevada quantidade de tempo e equipamentos elétricos e mecânicos necessários para realizar os testes.

apresentados na Figura 19, com seções transversais circulares e anelares para as amostras.

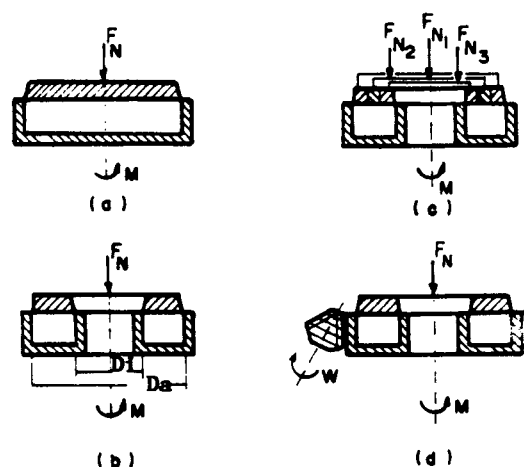


Figura 19. Modelos de aparelhos diretos com deslocamento rotacional.

O processo de cisalhamento é induzido pela rotação em volta do eixo vertical. As tampas de todos os aparelhos mostrados na Figura 19 (a)(b)(c)(d), são ásperas (ranhuradas) para se ter certeza de que o processo de cisalhamento é realizado dentro do produto armazenado e não entre ele e a tampa. Na maioria dos aparelhos, a base é girada e o momento de cisalhamento atuante sobre a tampa é medido. No aparelho com seção transversal circular (a), chamado aparelho de cisalhamento torcional, não existe cisalhamento no centro. Portanto, são usados aparelhos de cisalhamento anelares (b-d). Existe influência da relação D_i/D_a (Figura 19 (b)) sobre os resultados como mostrado na Figura 20. Sobre um ângulo α de

rotação a força no centro do anel é F_s , na parede exterior $F_s + \Delta F_s$ e na parede interior $F_s - \Delta F_s$. Se uma amostra sobreconsolidada é cisalhada e o valor máximo da tensão de cisalhamento é obtido exatamente no meio, isto significa que está acima do máximo na parede externa e não alcançou o máximo na parede interna. O momento de cisalhamento total é medido até resultar um valor médio da tensão de cisalhamento, o qual é menor que o valor máximo necessário para determinação dos lugares geométricos. Somente a determinação do fluxo de estado estável é sem problemas, desde que ele seja obtido e mantido sobre todo o raio após algum tempo.

Para investigar a influência de D_i/D_a , qualquer anel do aparelho de cisalhamento com valores diferentes de D_i/D_a são usados (Figura 19 (b)), ou uma tampa equipada de três anéis concêntricos, dos quais não se toca um ao outro (Figura 19 (c)). Outro método complicado para chegar ao teste de cisalhamento com anel é mostrado na Figura 19 (d). A célula de cisalhamento consiste de vários anéis, da qual gira em diferentes velocidades até produzir deformação similar ao aparelho de cisalhamento simples.

A vantagem dos aparelhos de cisalhamento direto com deslocamento rotacional é a tensão de cisalhamento ilimitada. A desvantagem é o desconhecimento da distribuição radial das tensões de cisalhamento.

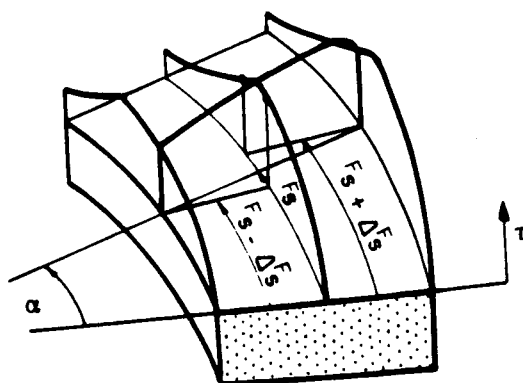


Figura 20. Influência da relação D_i/D_a sobre os resultados.

3.2.2.3. Aparelhos de cisalhamento indireto

Com exceção dos aparelhos de cisalhamento simples, nenhum aparelho de cisalhamento direto é capaz de medir o círculo das tensões de Mohr completo. Nos aparelhos de cisalhamento indireto, as tensões principais são medidas em duas ou três direções, portanto, o círculo das tensões de Mohr pode facilmente ser desenhado, sendo distinguidos entre aparelhos biaxial e triaxial. Nos aparelhos biaxial (Figura 21), nenhuma deformação é possível na direção Z até resultar em um plano de deformação. Na Figura 21 dois aparelhos são mostrados; o segundo (b) é chamado de aparelho biaxial verdadeiro, visto que os limites da amostra permanecem planos e paralelos.

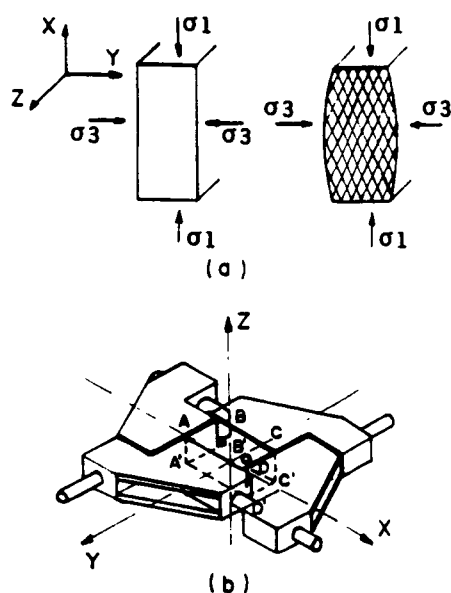


Figura 21. Aparelhos biaxiais.

Para testar um produto armazenado no aparelho biaxial, as amostras devem ser cobertas por uma membrana de borracha. A amostra é colocada na direção x entre duas matrizes móveis e é tensionado na direção y por uma tensão hidráulica σ_3 . Por movimento, as matrizes na direção x, uma contra outra, as tensões σ_1 aumentarão até a ruptura ser obtida. Depois de ocorrer rupturas, medidas não são possíveis. Assim, amostras sobreconsolidadas podem somente ser testadas até o ponto de tensão de cisalhamento máximo. A ruptura toma lugar ao longo do plano de deslizamento da qual pode ser observada.

A amostra AA' BB' CC' DD' no aparelho biaxial verdadeiro, é limitado na direção x e y por paredes planas/

paralelas. Estas poderão ser movimentadas independentemente na direção x e y. Entre a amostra e a parede, uma membrana de borracha e um fino filme de óleo de silicone assegura o esforço de cisalhamento mínimo; estes aparelhos têm algumas vantagens em comparação aos de cisalhamento direto e ao indireto biaxial normal. A deformação em cada direção pode ser força controlada e todas possibilidades tensão-força-trajetória podem ser medidas. O aparelho biaxial verdadeiro pode também ser usado para região de tensões baixas. Isto não é possível com o aparelho biaxial normal, onde a amostra deve ser colocada dentro de uma membrana de borracha fora do aparelho antes do teste. Para estabilizar a forma da amostra da membrana de borracha, deve-se submetê-la a tensões prévias. Portanto, tensões altas devem ser usadas durante o processo de cisalhamento para assegurar que as tensões prévias em que a membrana de borracha foi submetida possam ser desprezadas. Duas versões do aparelho triaxial são mostradas na Figura 22. A única diferença entre os aparelhos biaxial normal e triaxial é a forma cilíndrica da amostra no caso triaxial. A terceira tensão principal σ_3 é idêntica a segunda σ_2 . Nas 6 paredes do aparelho triaxial verdadeiro existem limites da amostra que são arranjadas em tal direção que as deformações nas direções x, y e z são possíveis ao mesmo tempo, independentemente e em diferentes proporções.

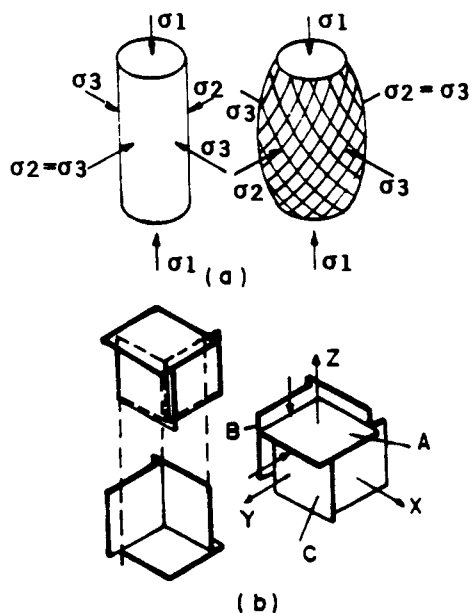


Figura 22. Duas versões do aparelho triaxial.

Para os testes, a amostra deve ser colocada em uma membrana de borracha, igual aos testes dos aparelhos bi e triaxial normal, preparadas fora do aparelho. A membrana de borracha deve ser submetida a tensões prévias e, portanto, estes aparelhos não são aplicados na sua forma presente em região de baixas tensões. A vantagem do aparelho triaxial verdadeiro é o fato de que a tensão principal pode ser variada independentemente. Portanto, é possível verificar se a tensão principal intermediária tem influência sobre o limite de deslizamento ou não, como assumido nos critérios de deslizamento de Mohr-Coulomb.

3.2.2.4. Comparação entre os Aparelhos de Cisalhamento

O Quadro O2 faz uma comparação direta entre os aparelhos com uma seleção arbitrária dos itens. O discernimento corresponde a uma experiência e opinião de SCHWEDES (1981). O símbolo x representa um julgamento positivo e o traço (-) um negativo. Em particular os itens a seguir são mencionados:

3.2.2.4.1. Ângulo de atrito interno

Este ângulo pode ser medido em todos os aparelhos, mas os resultados com mesmo produto podem ser diferentes de aparelho para aparelho.

3.2.2.4.2. Ângulo de atrito da parede

Este ângulo pode ser obtido somente com o auxílio dos aparelhos de cisalhamento direto. Particularmente, o aparelho de Jenike, a base da célula deve ser substituída por uma amostra do material da parede.

QUADRO 02 - Comparação direta dos aparelhos de cisalhamento.

Determinações	Aparelhos									
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Ângulo de atrito interno	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ângulo de atrito com a parede	X	X	-	X	X	X	-	-	-	-
Resistências ao cisalhamento e à compressão	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Tempo de consolidação	X	X	-	X	X	-	-	-	-	-
Distribuição de tensões	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X
Deformação homogênea	-	-	X	-	-	-	X	X	X	X
Estado de tensão completo	-	-	X	-	-	-	X	X	X	X
Estado de deformação completo	-	-	X	-	X	X	X	X	X	X
Utilizável para materiais granulares grandes (> 10 mm)	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X
Utilizável para pequenas pressões (< 1 N/cm ²)	X	X	X	X	X	X	-	X	-	-
Tempo necessário p/ o ensaio	X	X	-	X	X	X	X	-	X	-
Manipulação do equipamento	X	X	-	X	X	-	X	-	X	-

a - Aparelho de Casagrande

b - Aparelho de Jenike

c - Aparelho de cisalhamento simples

d - Aparelho de cisalhamento torcional

e - Aparelho de cisalhamento anelar

f - Aparelho de cisalhamento anelar (03 anéis)

g - Aparelho biaxial

h - Verdadeiro aparelho biaxial

i - Aparelho triaxial

j - Verdadeiro aparelho triaxial

3.2.2.4.3. Resistências de cisalhamento e compressão

Ambas resistências são caracterizadas para um material granular. Elas podem ser determinadas com todos os aparelhos, mas não se pode esperar que todos os resultados coincidam.

3.2.2.4.4. Tempo de consolidação

Alguns produtos armazenados, especialmente os coesivos, ganham resistência com o tempo quando armazenados sob carregamento. Para determinar este tempo de consolidação quantitativamente, é necessário grande número de medições separadas. Em princípio, todo aparelho é capaz de medir o efeito do tempo de consolidação. Para longos períodos de influência de tempo e o cuidado de manter o grande número de medidas separadas, somente o aparelho de cisalhamento de Jenike pode ser avaliado como conveniente. A razão é a simples forma da célula de cisalhamento, da qual pode ser produzida em quantidades, sem altos custos.

3.2.2.4.5. Distribuição das tensões

Em todos aparelhos são medidos forças. O julgamento positivo indica que as tensões produzidas pelas forças são uniformemente distribuídas através do plano de ação.

3.2.2.4.6. Deformação homogênea

Mesma opinião do item 3.2.2.4.5.

3.2.2.4.7. Estado de tensões completos

Julgamento positivo, somente se o círculo de Mohr para tensões puder ser obtido sem qualquer hipótese.

3.2.2.4.8. Estado de forças completos

Mesma opinião do item 3.2.2.4.7.

3.2.2.4.9. Adequação para produtos armazenados elásticos

O limite da força de cisalhamento, em aparelhos de cisalhamento direto com deslocamento de translação, pode muitas vezes, ser insuficiente para alcançar fluxo de estado estável.

3.2.2.4.10. Adequação para produtos armazenados de partículas grossas

A força limitada pode não ser suficiente. Adicionalmente as partículas grossas podem ser prensadas entre a base e o anel nos aparelhos de cisalhamento direto com deslocamento de translação, podendo alterar a medida da força de cisalhamento para uma extensão desconhecida.

3.2.2.4.11. Adequação para pequenas pressões (<1 N/cm²)

Na escala de pressões menores de 1 N/cm², os aparelhos de cisalhamento indireto não podem ser usados. O motivo é a preparação da amostra fora do aparelho numa membrana

de borracha que deve ser submetida a tensões prévias.

3.2.2.4.12. Tempo necessário para um teste de cisalhamento

No modo (x) tempo curto.

3.2.2.4.13. Custo do equipamento

No modo (x) aparelhos baratos que não são difíceis de trabalhar.

SCHWEDES (1981) descreve o trabalho de Okmiwik (1979) que mediu as propriedades de cisalhamento de 10 diferentes produtos armazenados, com a ajuda de quatro tipos de aparelhos:

- a) Aparelho de cisalhamento Casagrande;
- b) Aparelho de cisalhamento de Jenike;
- c) Aparelho de cisalhamento anelar;
- d) Aparelho triaxial.

O Quadro 03 apresenta os resultados de ângulos de atrito do efetivo lugar geométrico ϕ_e , obtidos destes dez produtos em fluxo de estado estável, destes quatro tipos de aparelhos e a proposta de PIEPER utilizando a norma alemã DIN 1055, parte 6 (para resistência de paredes de silos).

A despeito da grande dispersão, algumas tendências podem ser deduzidas desta tabela.

Os ângulos medidos com o aparelho de Jenike são, com uma única exceção, maiores do que os obtidos no aparelho de

Casagrande que, geralmente, mede ângulos de atrito que são também pequenos. O motivo é uma inclinação na tampa de cisalhamento durante o teste com um resultado desigual das distribuições de tensões e deformações. Uma inclinação similar da tampa de cisalhamento pode ocorrer no aparelho de Jenike, devido a amostra ter uma pré-consolidação e a aplicação de uma força de cisalhamento com direção mais homogênea, uma distribuição de tensões mais regular do que a normalmente usada no aparelho Casagrande.

Quadro O3 - Ângulo de atrito do efetivo lugar geométrico de dez produtos com quatro aparelhos de cisalhamento.

PRODUTOS	TAMANHO MÉDIO DA PARTÍCULA (μM)	APARELHOS DE CISALHAMENTO				PROPOSTA DE PIEPER (GRAUS)
		CASAGRANDE	JENIKE	ANELAR	TRIAxIAL	
		(GRAUS)				
FARINHA	2700	33	39	32	32	31
MILHO (PLATA)	6800	37	42	34	35	28
MILHO (USA)	6500	34	41	30	41	28
QUARTZO(1% 4 mm)	2300	40	44	37	37	36
PLASTICO	2800	22	28	28	24	-
CIMENTO-CLINKER (10% 12 mm)	6600	36	42	33	33	36
AÇÚCAR	450	32	38	37	-	34
CIMENTO	25	29	40	39	-	28
FOSFATO-THOMAS	44	38	37	36	42	-
ÓXIDO-ALUMÍNIO	70	26	36	37	34	-
FARINHA DE TRIGO	35	27	40	38	-	20

Comparando-se os produtos com partículas de tamanho pequeno, os últimos cinco ângulos medidos com os

aparelhos de Jenike e de cisalhamento anelar são quase idênticos. Isto está de acordo com a afirmação prematura dada sobre a influência do raio na tensão de cisalhamento, que é uma desvantagem dos aparelhos de cisalhamento anelares, não existe para o fluxo de estado estável, que é caracterizado pelo ângulo ϕ_e .

Para produtos armazenados de partículas grossas, com uma exceção, existe um bom acordo entre os aparelhos de cisalhamento anelar e triaxial. Isto pode ser explicado pelo fato destes produtos armazenados serem pouco coesivos e quase incompressíveis. Portanto, a densidade do produto não difere muito com a pressão e os ângulos medidos em pressão alta, que só podem ser obtidos no aparelho triaxial, seriam quase os mesmos em baixa pressão. Os aparelhos de cisalhamento tipos Casagrande e Jenike não são apropriados para produtos armazenados de partículas grossas. A concordância entre alguns valores dos aparelhos de cisalhamento tipo Casagrande, anelar e triaxial parecem ser de fato casuais.

Não existe concordância com as medidas e as propostas por Pieper. Portanto, os valores de Pieper não podem ser entendidos como verdadeiros ângulos de atrito, mas somente como parâmetros aproximados para uso das equações da norma alemã DIN 1055, parte 6.

No estudo dos dados apresentados, ambos os quadros (02 e 03) demonstraram que nenhum aparelho universal existe e, dependendo de cada aplicação, eles têm vantagens e

desvantagens.

HAAKER (1990) relata que da maioria dos aparelhos de cisalhamento estudados por Schwedes (1979), um dos mais utilizados é o de Jenike, no qual as propriedades de fluxo dos produtos são medidos de acordo com um método bem descrito, levando em geral, a resultados seguros para projetos de silos.

A Working Party the Mechanics of Particulate Solids (WPMPS, 1991), da Federação Européia de Engenharia Química, dado os resultados obtidos por Schwedes (1979) da análise dos vários tipos de equipamentos utilizados para medir as propriedades de fluxo dos produtos armazenados, decidiu investigar técnicas de medidas mais detalhadas para o aparelho de Jenike. Através de amostras de produtos pré-determinados, foram distribuídos a 20 laboratórios em todas as partes do mundo, sendo as propriedades de fluxo medidas utilizando a célula de cisalhamento de Jenike com a técnica costumeira e disponível dentro de cada laboratório.

A comparação das medidas mostraram que elas foram um pouco dispersas nos resultados obtidos. Depois de análises detalhadas, foi concluído que para resultados confiáveis das propriedades do fluxo do produto armazenado, deve-se usar a célula standard de Jenike, padronizando a técnica do teste e especificando detalhes suficientes para eliminar as variações do operador e do equipamento.

A única descrição detalhada do aparelho de cisalhamento de Jenike e seu uso é o manual preparado por

Jenike & Johanson Inc. aparelho de Fator de Fluxo e Instruções de Operações da Bancada de Consolidação (1979, Versão 3). Estas instruções de operação eram as únicas disponíveis sobre o aparelho de cisalhamento.

A WPMPS, por essa razão, iniciou o trabalho em grupo na obtenção da Standard Shear Testing Technique. Dr. A.W. Jenike forneceu também instruções detalhadas de operação da Jenike Shear Cell ajudando o trabalho do grupo. Com estas instruções detalhadas e as experiências dos membros da WPMPS um novo procedimento da Standard Testing foi feito do qual alguns detalhes diferiram dos descritos do manual do JENIKE & JOHANSON (1979).

Segundo CALIL JR. (1990), as principais normas internacionais de silos tem como referência principal o trabalho desenvolvido por A.W. Jenike, na Universidade de Utah, nos Estados Unidos da América.

Das normas internacionais, a inglesa BMHB-1985, destaca-se como a mais direta na adoção e descrição do trabalho de A.W. Jenike com a técnica de teste do aparelho de cisalhamento de Jenike.

4. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE PRODUTOS ARMAZENADOS

A determinação das propriedades de produtos armazenados foram realizadas com o aparelho de cisalhamento direto, de movimento de translação, conhecido a nível internacional por "Jenike Shear Cell" (Máquina de ensaio TSG 70-140), tendo como base principal os seguintes trabalhos:

- Manual da máquina do Departamento de Estruturas (OPERATING INSTRUCTIONS FOR THE TRANSLATIONAL SHEAR TESTER TSG 70-140);

- Manual SSTT (STANDARD SHEAR TESTING TECHNIQUE), trabalho desenvolvido pela Federação Européia de Engenharia Química WPMPs-1989 (WORKING PARTY THE MECHANICS OF PARTICULATE SOLIDS);

- JENIKE & JOHANSON (1979): Instruções de operações do aparelho de fator fluxo e da bancada de

consolidação (FLOW FACTOR TESTER AND CONSOLIDATING BENCH OPERATING INSTRUCTIONS);

Norma inglesa BMHB (1985).

4.1. Aparelho de Cisalhamento de Jenike

Dado ao grande desenvolvimento da mecânica dos sólidos, Jenike em 1952, iniciou seus estudos investigando a aplicabilidade dos equipamentos de testes disponíveis da mecânica dos solos (aparelho triaxial, aparelhos de cisalhamento diretos, aparelho de cisalhamento anelar) para medir as propriedades dos produtos armazenados.

Visto que, todos estes equipamentos foram insatisfatórios, Jenike desenvolveu um método e um aparelho de cisalhamento direto para produtos armazenados, o qual chamou de "Jenike Shear Cell".

O aparelho de cisalhamento de Jenike (Figura 23) é equipado com: uma célula de cisalhamento de forma circular, a qual é colocada sobre a base da máquina; um pendural com pesos, para aplicação de uma carga vertical por gravidade na célula; um suporte de carga acionado eletro-mecanicamente, o qual promove a ação do cisalhamento movendo-se horizontalmente numa velocidade entre 01 e 03 mm/minuto; uma célula de carga para medir a força de cisalhamento e um registrador para indicação desta força.

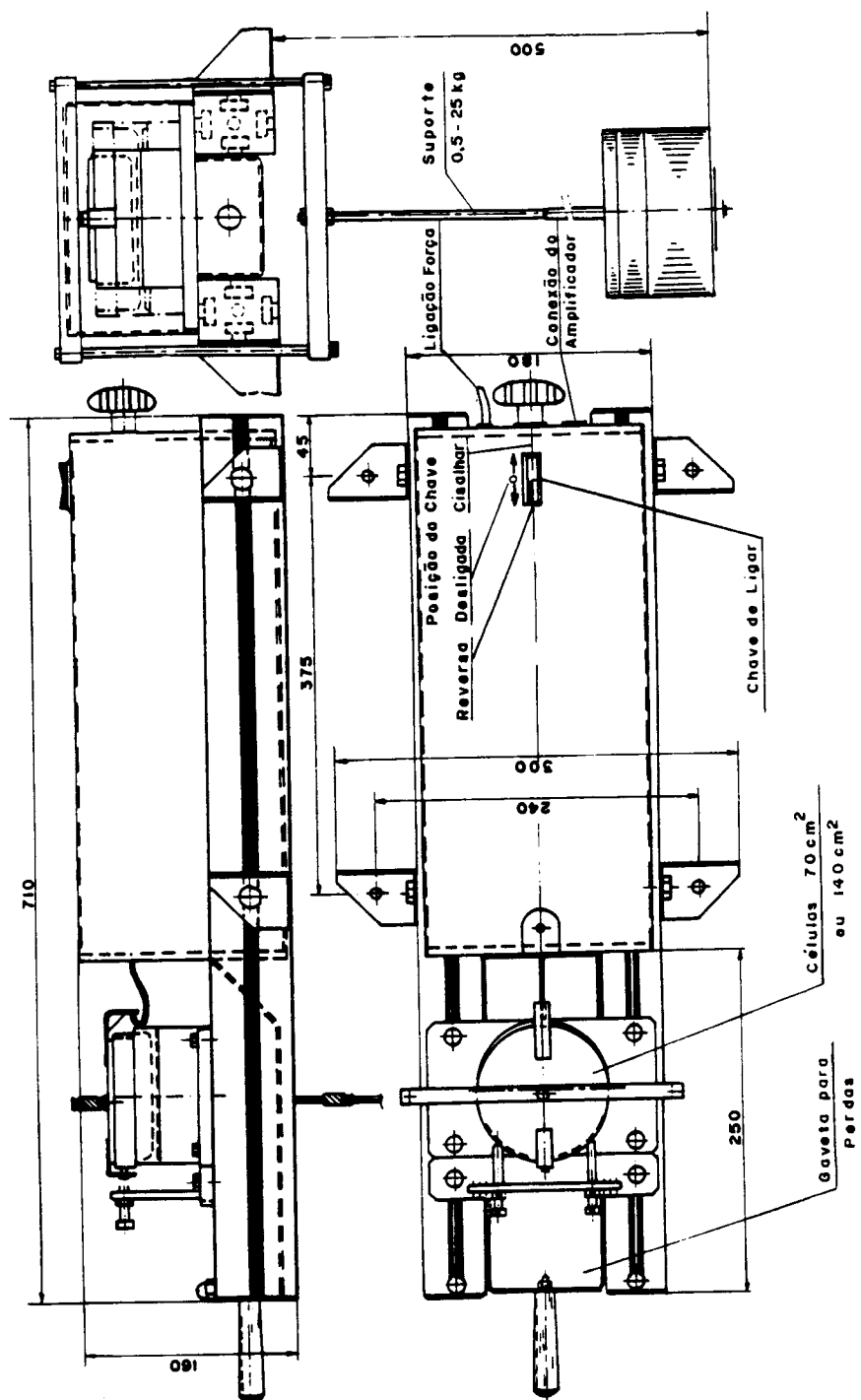


Figura 23. Aparelho de cisalhamento de Jenike.

Para determinação do efeito do tempo na consolidação de produtos armazenados, é utilizada uma bancada de consolidação em conjunto com o aparelho de cisalhamento. A bancada de consolidação consiste de seis conjuntos (Figura 24), onde as células do aparelho de cisalhamento são transferidas para permanecerem no tempo pré-determinado, sob ação de uma força vertical estática, por meio do pendural de pesos com cargas. Durante a consolidação, as células são colocadas dentro de coberturas impermeáveis para preservar a umidade contida na amostra.

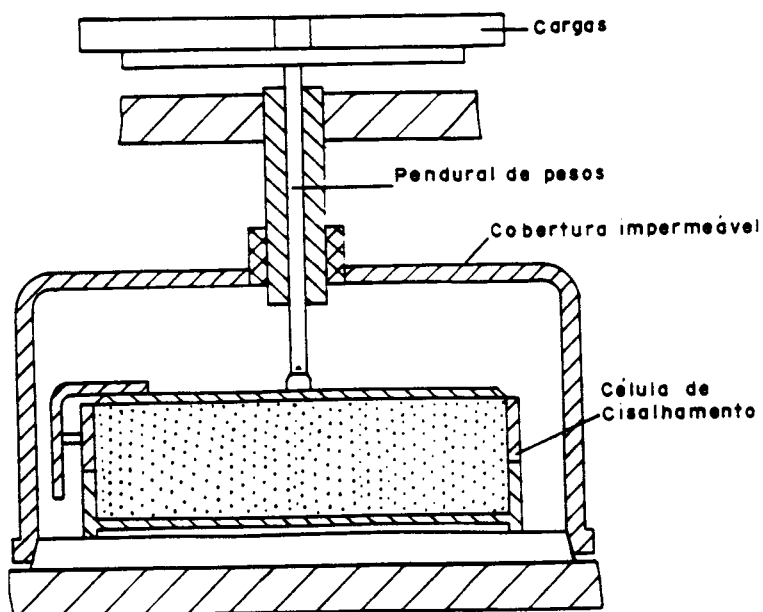


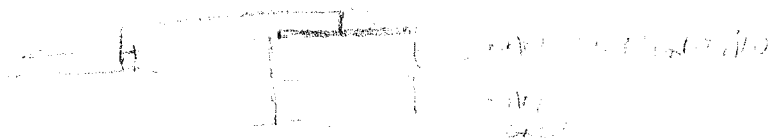
Figura 24. Detalhe de um conjunto da bancada de consolidação.

4.2. Princípio do Teste de Cisalhamento

A célula de cisalhamento de Jenike, mostrada na

Figura 25, consiste de: 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 off-set, como mostra a Figura 26, e uma força vertical (FV) é aplicada na tampa, e conseqüentemente nas partículas do produto dentro da célula, por meio do pendural de pesos (6) com cargas (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 01 a 03 mm/minuto. A haste é fixada a um sistema de forças e, através de um transdutor, mede a força do cisalhamento F_s . Durante a operação de cisalhamento, o anel de cisalhamento move-se da posição off-set original, mostrado na Figura 25, para a posição off-set apresentada na Figura 26. 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 de um particular produto, desenvolve-se uma zona de cisalhamento. Visto que, a haste avança em velocidade constante, o registrador da força de cisalhamento versus tempo transforma essa força em tensão de cisalhamento. Portanto, é especialmente importante que a força de cisalhamento da haste de medida atue sobre o suporte no plano de cisalhamento (plano entre a base e o anel), nem acima ou abaixo deste plano.



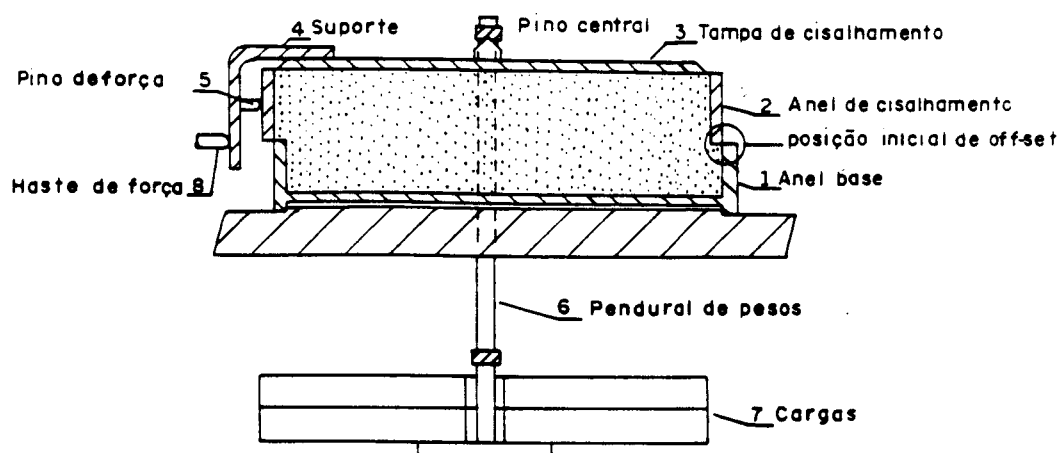


Figura 25. Célula de Jenike na posição inicial off-set.

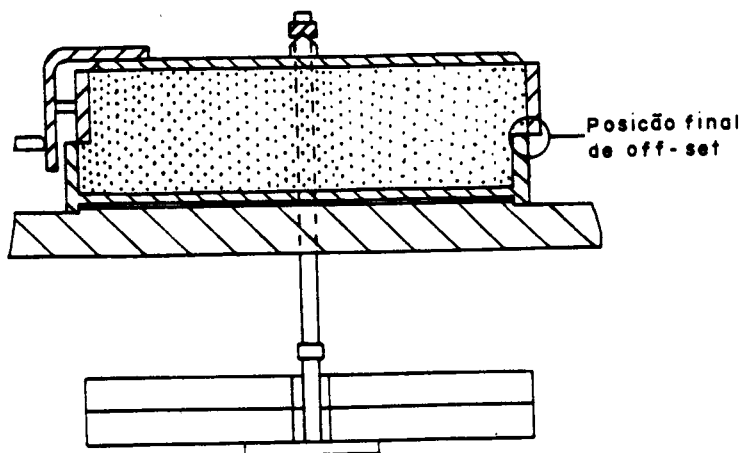


Figura 26. Célula de Jenike na posição final off-set.

Um procedimento especial é necessário para preparar a amostra no teste de cisalhamento. Inicialmente, o anel de cisalhamento é colocado em cima da base na posição off-set, mostrado na Figura 25, através de uma pressão suave do anel com os dedos contra o parafuso fixo (10), mostrado nas Figuras 27 e 28. O anel molde (11) é colocado sobre o anel de cisalhamento (Figura 28), a célula teste é enchida com o produto e o excesso é raspado e nivelado com o topo do anel molde. A tampa de operação de rotações (12) é colocada sobre a superfície do produto e sobre ela uma carga (7) é aplicada por meio de um pendural de pesos (6) de peso total W_c , desta maneira, compactando o produto. Depois são removidos, o pendural com as cargas, a tampa de operação de rotações e o anel molde e o produto é novamente raspado e nivelado com o topo do anel de cisalhamento. A seguir, a tampa de cisalhamento é colocada sobre a superfície nivelada, como mostra a Figura 27. Logo após, 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.

A força e respectiva tensão de cisalhamento registrada é inspecionada e, dependendo do grau de consolidação produzido no produto pela aplicação de cargas de peso W_p , podem ser obtidos três tipos de curvas de tensão de cisalhamento, conforme mostrados pela linha cheia na Figura 29.

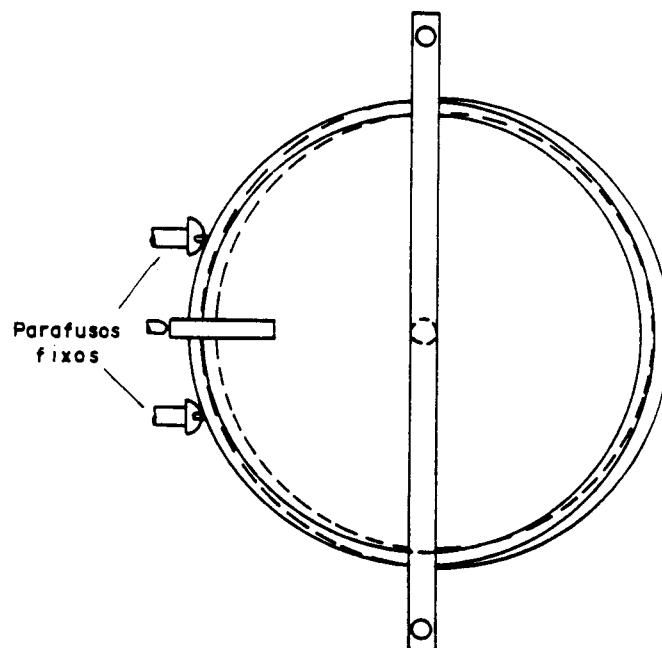


Figura 27. Vista de cima da célula de Jenike mostrando a posição off-set.

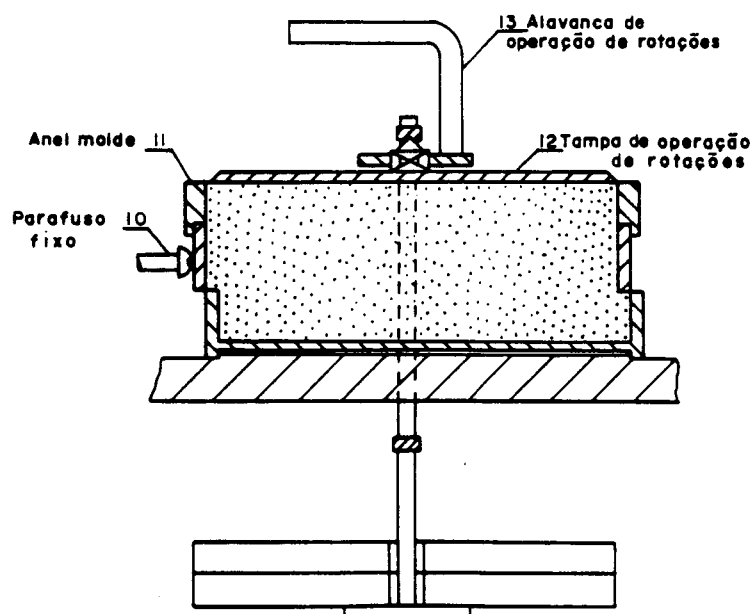


Figura 28. Célula de cisalhamento com anel molde e tampa de consolidação.

Se para o produto sob teste, o grau de consolidação é insuficiente, a força de cisalhamento aumenta continuamente durante o cisalhamento (Figura 29 - curva 3). Portanto, a amostra é dita estar subconsolidada e a densidade na zona de cisalhamento aumenta durante o teste. Se o grau de consolidação é excessivo, a força de cisalhamento aumenta inicialmente, passando diretamente a um máximo e depois diminui (curva 1 da Figura 29). Portanto, a amostra será sobreconsolidada e a densidade do produto na zona de cisalhamento diminui um pouco depois de passar completamente pelo ponto máximo.

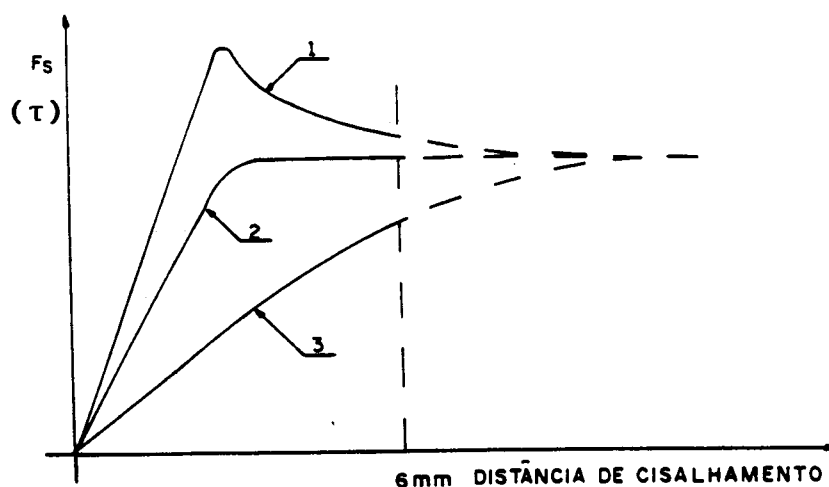


Figura 29. Curvas de força-tensão de amostras sobreconsolidadas (1); consolidada criticamente (2) e subconsolidadas (3).

Existe, contudo, um grau de compactação quando a força de cisalhamento cresce e alcançando um certo valor permanece constante durante o resto do cisalhamento (curva 2 da Figura 29). Portanto, a amostra é considerada "consolidada criticamente", e a partir do ponto em que o teste atinge uma força de cisalhamento constante é chamado de fluxo de estado estável. Assim sendo, a densidade da amostra do produto e a tensão de cisalhamento na zona cisalhamento permanecem constantes durante o teste.

Tem-se verificado que durante o fluxo de estado estável de um produto sob uma dada tensão normal agindo na zona de cisalhamento, a tensão de cisalhamento e a densidade do produto tem valores únicos.

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

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

cargas normais W_s , determinando as forças de cisalhamento necessárias para deslizamento do produto.

Para simplificar a situação, é possível imaginar que a célula de cisalhamento será capaz de cisalhar através de uma distância infinita (como por exemplo em uma célula de cisalhamento anelar), então, um fluxo de estado estável pode ser obtido simplesmente permitindo que a amostra cisalhe através de um comprimento infinito. Amostras subconsolidadas seguirão a representação da linha cheia e tracejada da curva 3, indicada na Figura 29. Sobreconsolidadas seguirão a representação da linha cheia e tracejada da curva 1, mostrada na Figura 29. Em ambos os casos a força de cisalhamento poderá eventualmente alcançar um nível correspondente a consolidação crítica da amostra, como na curva 2 (na realidade isto não é necessariamente o caso, desde que o cisalhamento prolongado pode pelo atrito ou orientação das partículas na zona de cisalhamento induzir a formação de um plano de cisalhamento separado, no qual as profundidades podem ser diferentes daquela zona de cisalhamento).

A célula de cisalhamento de Jenike é limitada a uma distância de cisalhamento de aproximadamente 6mm, representada pela linha vertical tracejada na Figura 29. Portanto, o fluxo de estado estável deverá ser alcançado dentro de uma distância de cisalhamento em torno de 4-5mm, deixando sobrar uma distância para o teste real de cisalhamento. A técnica para obter um fluxo de estado estável em curta

distância de cisalhamento desenvolvida por Jenike, chamado de consolidação, consiste de operações de rotações e de Pré-Shear.

O arranjo da célula de cisalhamento de Jenike para operações de rotações é mostrado na Figura 28. Um anel molde é colocado sobre o anel de cisalhamento e a célula é enchida com o produto do teste. O excesso do material é raspado e nivelado com o topo do molde do anel e a tampa (12) de superfície de fundo liso (tampa de operação de rotações) é colocado 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 operações 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 material nivelado e uma seleção de cargas W_p são aplicadas por meio do pendural de pesos. Um teste de cisalhamento é realizado na distância total de cisalhamento, e a força de cisalhamento - tensão de cisalhamento é medida e marcada. Se a amostra se encontrar subconsolidada, uma carga maior (W_c) ou um número maior de rotações devem ser aplicados na tampa. Se a amostra é sobreconsolidada, a carga (W_c) ou o número de rotações deverão ser reduzidos. Deste modo, é possível por tentativas encontrar uma combinação entre a carga (W_c) e o número de rotações, tal que a seleção de pesos W_t e a força de

cisalhamento - tensão de cisalhamento marcados 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 uma zona 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 cisalhamento cai à zero (Figura 30). Na segunda parte, a carga W_p é trocada por uma carga menor W_s , o motor é acionado novamente e a força é medida na haste na direção já desenvolvida. Quando a haste toca ao suporte, a força de cisalhamento aumenta rapidamente, indo direto a um valor máximo, representando a força de cisalhamento de deslizamento e depois ela começa a diminuir. Esta parte do teste é chamada de cisalhamento.

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

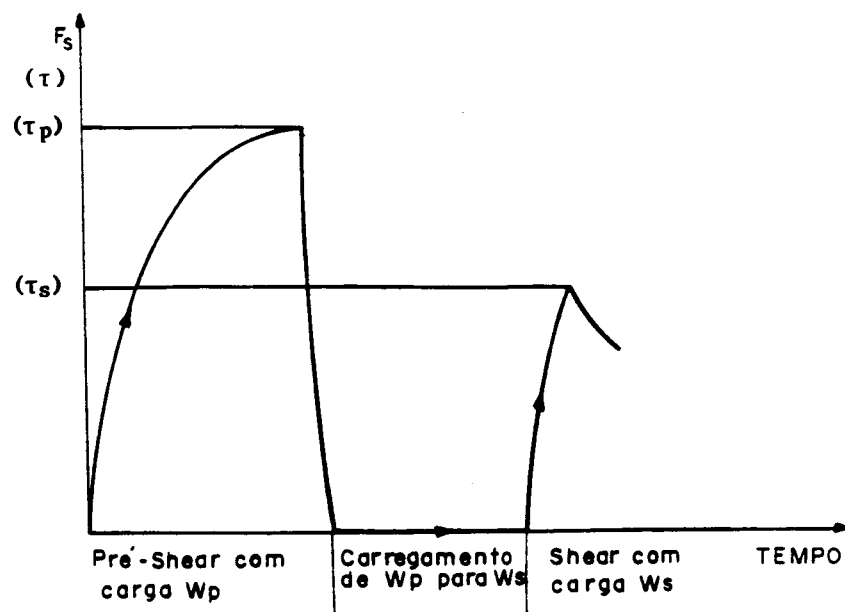


Figura 30. Curvas de força-tensão - pré-Shear e Shear.

O anel de cisalhamento é incluído na força vertical, visto que, durante o cisalhamento o material dilata na zona de cisalhamento. Desde então, o material contraído no anel de cisalhamento, seja qual for a dilatação contida na célula, conduz ao redor do anel um levantamento, tal que o seu peso é suportado pelo material contido, melhor do que na célula base.

Para o pré-shear isto não é exatamente deste modo, porque parte do peso do anel pode ser transferido para a base. Consequentemente porque durante o pré-shear a parcela de peso do anel transferida a base é incerta, o peso do anel é incluído nos pesos contribuindo para o total da força normal

quando calcula-se a força normal de pré-shear. A influência do contato anel-base sobre o cisalhamento e força normal pode ser evitado, tomando o cuidado de levantar levemente o anel de cisalhamento e realizar a operação de rotações até o fim com a mesma proporção anterior do cisalhamento.

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

Os resultados dos testes de cisalhamento estão no diagrama σ versus τ , como mostrados na Figura 30. No exemplo mostrado na Figura 31, quatro pontos ($P_1 - P_4$) são mostrados pelos círculos vazios e para cada ponto do pré-shear 4 pontos de cisalhamento são mostrados pelos círculos cheios ($S_{1,i} - S_{4,i}$). Os pontos de cisalhamento pertencem a um ponto de pré-shear sendo unidos por uma curva e em alguns casos uma reta, linha chamada de lugar geométrico, YL (também chamado lugar geométrico para fluxo instantâneo ou lugar geométrico instantâneo). Se o lugar geométrico é extrapolado por uma linha tracejada (Figura 32), então pode-se observar que o ponto de pré-shear pode ficar abaixo ou acima do lugar geométrico extrapolado.

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

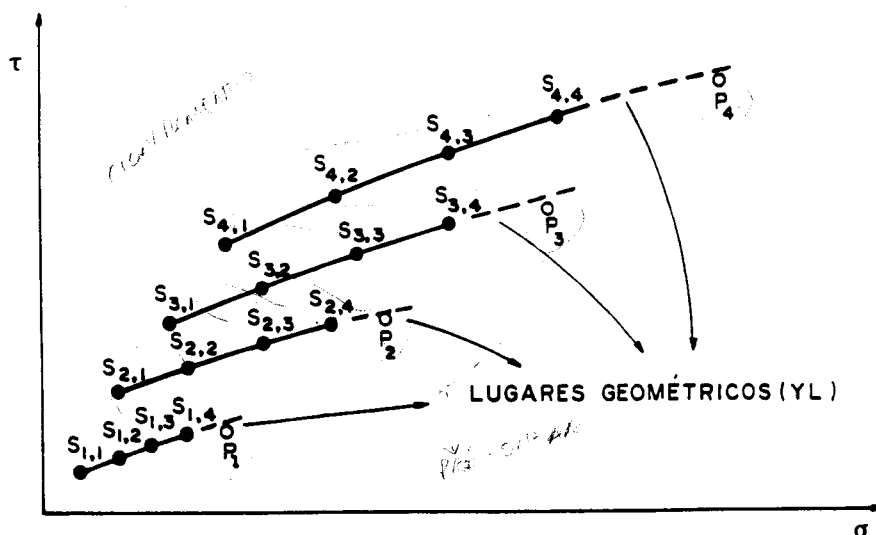


Figura 31. Família de lugares geométricos.

Em uma análise do diagrama σ versus τ , pode-se observar que os pontos de cisalhamento sobre o lugar geométrico não são igualmente espaçados entre as tensões normais, zero e pré-shear, mas inicia em um certo valor mínimo de tensão normal e termina com alguma distância antes da tensão normal de pré-shear ser alcançada. Considerando a situação em mais detalhes, a Figura 32 mostra um lugar geométrico com um ponto de pré-shear P e quatro pontos válidos de cisalhamento $S_1 - S_4$. O círculo de Mohr 1 (círculo de Mohr de estado estável) é desenhado através do ponto de pré-shear P e tangencialmente ao lugar geométrico extrapolado (o ponto de tangência é mostrado na Figura 32 como B e define o ponto final do lugar geométrico). O segundo círculo de Mohr 2 (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 32). Os pontos válidos de deslizamento devem ficar entre os pontos de tangência A e B.

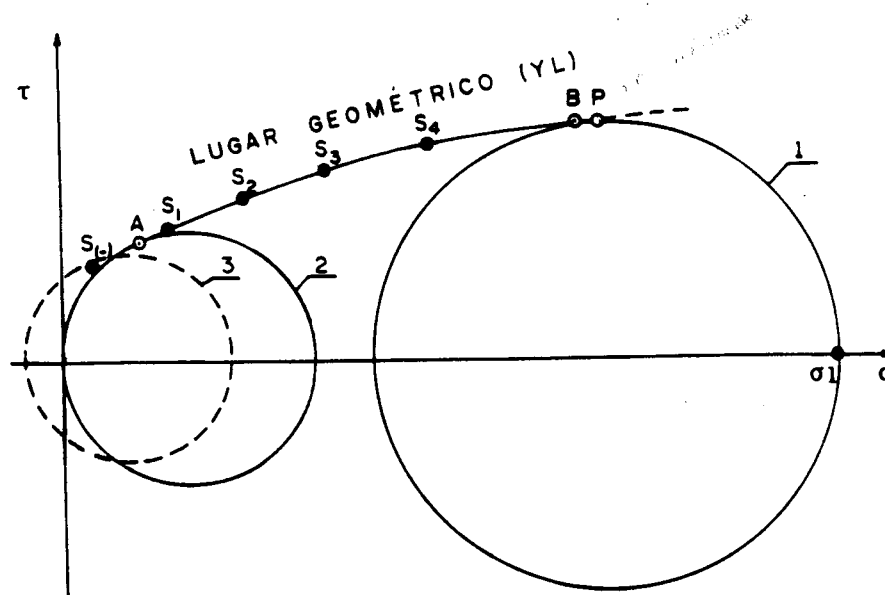


Figura 32. Lugar geométrico mostrando os pontos válidos de cisalhamento.

Pontos a esquerda do ponto A não são válidos, por que representam um estado onde um esforço de tração pode ocorrer na célula. Isto pode ser visto tomando como base o ponto de deslizamento $S(-)$, mostrado na Figura 32, abaixo do ponto A. Se um círculo de Mohr 3 é desenhado através deste ponto, que é tangente ao lugar geométrico extrapolado, parte do círculo irá ficar à esquerda da origem indicando tensão normal negativa (esforço de tração). A célula de cisalhamento de Jenike não é adaptada para tal esforço de tração, o qual se

presente, poderá inclinar-se e causar ao produto a separação da parede, deixando um vazio entre o enchimento da célula base e anel. Sob estas condições, a distribuição de tensões poderá ser significativamente não uniforme e a medida da tensão de cisalhamento σ_s , provavelmente será baixa e ficará abaixo do lugar geométrico.

Quando um produto é solicitado a uma carga normal ou a um esforço de compressão por algum tempo, ele pode ganhar resistência. Este ganho na resistência pode ser medido na célula de cisalhamento de Jenike e é chamado de tempo de consolidação.

O conhecimento do tempo de consolidação é obtido através do estudo dos experimentos a seguir. Uma amostra consolidada criticamente é preparada e pré-cisalhada com uma carga W_p . Depois de atingir o fluxo de estado estável, o avanço da haste de medida 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 de estado estável, e é aproveitada por um tempo definido. Depois da haste ser retraída, a força de cisalhamento cairá a zero e o atual teste de cisalhamento poderá ser realizado normalmente. É constatado que produtos que ganham resistência com o tempo de consolidação, adquirem uma maior resistência de cisalhamento. No diagrama σ versus τ , o lugar geométrico do tempo ficará acima do lugar geométrico instantâneo.

Se o teste de efeito do tempo de consolidação for

realizado na célula de cisalhamento de Jenike como descrito acima, um teste poderá monopolizar a célula por um longo período de tempo. Também, um deslocamento da amostra poderá causar uma diminuição da força de cisalhamento, aplicada durante o período de repouso.

Testes com tempo de consolidação são feitos com a ajuda de uma bancada de consolidação, constituída de várias células, das quais podem ser independentemente carregadas. 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-shear. A seguir, as células de cisalhamento (anel e tampa de cisalhamento, base e material) são transferidas para uma bancada de consolidação. Na condição de prevenir a evaporação ou o aumento da umidade com o meio ambiente, uma cobertura impermeável é colocada sobre cada célula, que são em seguida carregadas com a colocação de uma carga W_t , diretamente sobre a tampa ou via um pendural carregado. Depois de escolhido e transcorrido o intervalo de tempo, a célula é transferida para o aparelho de cisalhamento; uma carga W_s é selecionada e o teste de cisalhamento é realizado 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-shear (por exemplo, fluxo de estado estável). Durante o pré-shear atuam as tensões normal e de cisalhamento nas amostras. Contudo, na bancada de consolidação,

somente a tensão normal pode ser aplicada. O estado de tensões desenvolvido pela aplicação somente da tensão normal, pode ao seu término aproximar do desenvolvimento de um fluxo de estado estável. O círculo de Mohr, mostrado na Figura 33, é desenhado através do ponto P (fluxo de estado estável) e tangencial ao lugar geométrico. Durante o tempo de consolidação, a amostra é carregada com a tensão principal máxima σ_1 , e o seu círculo de Mohr é apresentado na Figura 33. Durante o teste com tempo de consolidação, o cisalhamento, normalmente, é realizado dentro de 3 ou mais níveis de tensões normais, diferentes da tensão de pré-shear. Os pontos de deslizamentos para um dado nível de tensão de pré-shear, são ligados por uma linha reta chamada de lugar geométrico de tempo TYL, que fica acima do lugar geométrico instantâneo (Figura 34). Em comum com pontos no lugar geométrico instantâneo, os pontos no lugar geométrico de tempo devem satisfazer certas condições para que sejam válidos. O mais baixo de deslizamento de tempo S_{jt} (Figura 34) deverá estar acima do ponto de tangência A_t do círculo de Mohr, passando através da origem e tangencial ao lugar geométrico de tempo. A tensão normal, aplicada no cisalhamento para o ponto de deslizamento de tempo maior S_{jt} , deverá ser maior do que a aplicada no ponto final B, do lugar geométrico instantâneo.

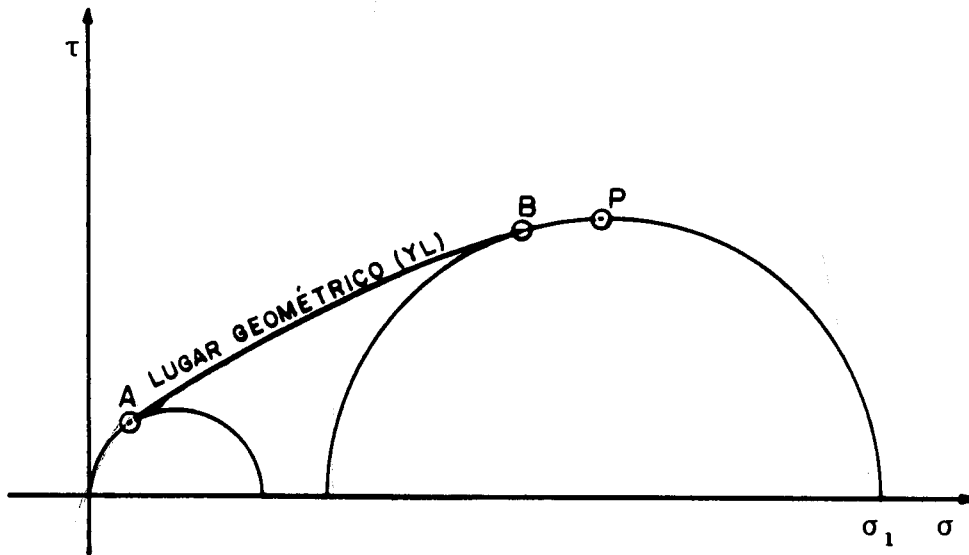


Figura 33. Lugar geométrico

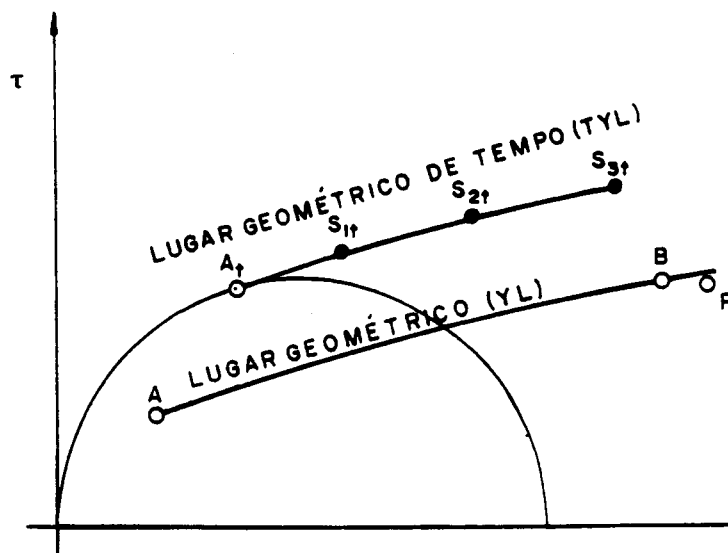


Figura 34. Lugares geométricos de tempo e instantâneo.

Quando mede-se o atrito, entre um produto e uma amostra de material da parede do silo, no teste a base da célula de cisalhamento é substituída por uma amostra de material. A amostra contida na parte superior da célula de cisalhamento (o anel e tampa de cisalhamento) é cisalhada sobre a amostra de material da parede, sob diferentes tensões normais de parede σ_w e os valores das tensões de cisalhamento são medidos. O ângulo de atrito da parede, ϕ_{wt} é obtido da relação τ_w/σ_w , por exemplo $\phi_w = \text{arc tan} (\tau_w/\sigma_w)$. O lugar geométrico da parede é uma linha reta ligando os pares dos valores medidos σ_w , τ_w .

4.3. Descrição das Determinações das Propriedades de Produtos Armazenados com a utilização do Aparelho de Cisalhamento de Jenike

4.3.1. Teste de cisalhamento instantâneo

4.3.1.1. Escolha da amostra

Para realização dos testes é necessário escolher amostras representativas do produto que assegurem as condições de campo. A fluxibilidade do produto é afetada pela umidade contida, tamanho e distribuição das partículas e temperatura.

A umidade contida no produto depende do equilíbrio do meio ambiente. Para prevenir a evaporação ou absorção, é aconselhável guardá-lo em recipiente fechado,

restituindo a sua cobertura entre os testes. A variação da umidade do produto dentro do recipiente é evitada misturando-a e durante os testes a amostra do produto e a célula devem ser manuseadas rapidamente. Medições ideais deverão ser feitas em sala de ar condicionado com umidade controlada.

O efeito do tamanho e distribuição das partículas não interfere como parece ser à primeira vista. Durante o fluxo de uma massa, misturam-se os tamanhos de partículas, as grandes movem-se em conjunto, enquanto o sólido cisalha primeiramente através das finas. As partículas grossas contribuem pouco para coesão da massa, portanto, a fluxibilidade da massa depende das propriedades das finas.

Partículas grandes poderão ser removidas para realização dos testes, desde que o processo de remoção não altere a estrutura do sólido. Cuidados durante o transporte deverão ser tomados, para que não ocorra segregação do produto.

O efeito da temperatura sobre a fluxibilidade de determinados produtos pode ser significativo. Os testes de cisalhamento e a bancada de consolidação devem oferecer condições de controle da temperatura exigidas pelo produto, ou os ensaios serem realizados em sala com temperatura controlada.

Essas recomendações, de uma maneira geral, são seguidas nos trabalhos tomados como base citados no item 4), sendo melhores detalhados no Manual SSTT e na norma inglesa (BMHB-1985).

4.3.1.2. Seleção da célula de cisalhamento

O aparelho de cisalhamento de Jenike utiliza basicamente duas células de cisalhamento, diferenciadas em função de suas dimensões e dos materiais em que são constituídas (aço inoxidável-SS e alumínio-AL).

4.3.1.2.1. SSTT

Adota a célula STANDARD (63,5 mm) para uma densidade do produto entre 300 e 2400 daN/m³. Para produtos com densidades abaixo de 300 daN/m³, ou quando se realiza testes de cisalhamento com níveis de tensões muito baixos, recomenda uma célula de metal leve (AL).

Em níveis altos de tensões normais de pré-shear, com densidade do produto acima de 2400 daN/m³, pode ser usada uma célula de cisalhamento de diâmetro menor se o transdutor de força disponível tiver a escala necessária.

4.3.1.2.2. TSG 70-140

Utiliza duas células de cisalhamento e são diferenciadas em função das dimensões das áreas de suas seções transversais, tamanhos I (70 cm²) e II (140 cm²). Aconselha o uso do tamanho II para produtos armazenados caracterizados como difíceis (partículas grossas ou elástico).

4.3.1.2.3. JENIKE & JOHANSON (1979)

Recomenda a utilização de duas células de

cisalhamento , caracterizadas em função das dimensões de seus diâmetros 64 (63,5 mm) e 95 (95,25 mm). E a utilização das células (Tabela 01) é definido em relação a densidade do produto armazenado sob vários níveis de consolidação.

4.3.1.2.4. BMHB

Adota dois tamanhos para as células de cisalhamento, diferenciadas pelas dimensões de seus diâmetros 63 (63,5 mm) e 95 (95,25 m). As células são definidas em função da densidade do produto e de níveis de carga normais (Tabela 02).

4.3.1.3. Seleção dos níveis de cargas normais

Os níveis de cargas normais são definidos no teste de cisalhamento em função de duas etapas: pré-cisalhamento (pré-shear) e cisalhamento (shear).

4.3.1.3.1. SSTT

Faz uma equivalência entre cargas e tensões e utiliza as tensões normais. O primeiro nível de tensão normal de pré-shear σ_{p1} é selecionada com base na densidade do produto (Tabela 03) e os outros níveis de tensões normais de pré-shear são escolhidos de tal forma que:

$$\sigma_{p2} = 2 \sigma_{p1};$$

$$\sigma_{p3} = 4 \sigma_{p1};$$

$$\sigma_{p4} = 8 \sigma_{p1}$$

Tabela 01 - Células para testes de cisalhamento - JENIKE & JOHANSON (1979).

DENSIDADE DO PRODUTO (γ) (daN/m ³)	DESCRIÇÃO DA CÉLULA DIÂMETRO (mm)	MATERIAL
$\gamma < 300$	95	AL
$300 < \gamma < 800$	95	SS
$800 < \gamma < 1600$	95 64	SS SS
$1600 < \gamma < 2400$	95 64	SS SS
$\gamma > 2400$	64	SS
NÍVEL DE CONSOLIDAÇÃO - 01		
$\gamma < 300$	95	AL
$300 < \gamma < 800$	95	SS
$800 < \gamma < 1600$	95	SS
$1600 < \gamma < 2400$	95 64	SS SS
$\gamma > 2400$	95 64	SS SS
NÍVEL DE CONSOLIDAÇÃO - 02		
$\gamma < 300$	95	AL
$300 < \gamma < 800$	95	SS
$800 < \gamma < 1600$	95	SS
$1600 < \gamma < 2400$	95	SS
$\gamma > 2400$	95	SS
NÍVEL DE CONSOLIDAÇÃO - 03		
$\gamma < 300$	95	AL
$\gamma < 300$	95	SS
NÍVEL DE CONSOLIDAÇÃO MÍNIMO		

Tabela 02 - Células de cisalhamento - BMHB

DENSIDADE DO PRODUTO (γ) (daN/m ³)	DESCRIÇÃO DA CÉLULA DIÂMETRO (mm)	MATERIAL
$\gamma < 300$	95	AL
$300 < \gamma < 800$	95	SS
$800 < \gamma < 1600$	95	SS
$1600 < \gamma < 2400$	95	SS
$\gamma > 2400$	95	SS
NÍVEL DE CARGA NORMAL - 01		
$\gamma < 300$	95	AL
$300 < \gamma < 800$	95	SS
$800 < \gamma < 1600$	95	SS
$1600 < \gamma < 2400$	95 63	SS SS
$\gamma > 2400$	95 63	SS SS
NÍVEL DE CARGA NORMAL - 02		
$\gamma < 300$	95	AL
$300 < \gamma < 800$	95	SS
$800 < \gamma < 1600$	95	SS
	63	SS
$1600 < \gamma < 2400$	95 63	SS SS
$\gamma > 2400$	63	SS
NÍVEL DE CARGA NORMAL - 03		

Tabela 03 - Níveis de tensões normais de σ_{p1} - SSTT.

DENSIDADE DO PRODUTO (γ) (daN/m ³)	σ_{p1} (N/m ²)
$\gamma < 300$	1500
$300 < \gamma < 800$	2000
$800 < \gamma < 1600$	2500
$1600 < \gamma < 2400$	3000
$\gamma > 2400$	4000

Os testes são realizados primeiramente usando um nível de tensão normal de pré-shear σ_{p1} e depois com níveis maiores. Para o shear sugere a utilização de 03 a 05 níveis de tensões normais, escolhidos dentro de uma escala de 25 a 28% de cada nível de tensão normal de pré-shear.

4.3.1.3.2. TSG 70-140

O manual da máquina adota os níveis de cargas normais em função das dimensões das células de cisalhamento (Tamanhos I e II), e são apresentados na Tabela 04.

Tabela 04 - Níveis de cargas normais do teste de cisalhamento
TSG 70-140

CÉLULAS DE CISALHAMENTO				
TAMANHO I (70 cm ²)		TAMANHO II (140 cm ²)		
CARGAS (daN)		CARGAS (daN)		
PRÉ-SHEAR (H+W _p)	SHEAR (H+W _s)	PRÉ-SHEAR (H+W _p)	SHEAR (H+W _s)	
H + 0,5	H + 0 H + 0,1 H + 0,2			
H + 0,1	H + 0 H + 0,2 H + 0,5	H + 1,0	H + 0 H + 0,2 H + 0,5	
H + 2,0	H + 0,2 H + 0,5 H + 1,0	H + 2,0	H + 0,2 H + 0,5 H + 1,0	
H + 4,0	H + 0,5 H + 1,0 H + 2,0	H + 4,0	H + 0,5 H + 1,0 H + 2,0	
		H + 8,0	H + 2,0 H + 3,0 H + 5,0	

H - peso do pendural de pesos

W_p - carga normal de pré-shear

W_s - carga normal de cisalhamento

4.3.1.3.3. JENIKE & JOHANSON (1979)

Define as cargas normais em função das dimensões das células de cisalhamento e da densidade do produto armazenado sob vários níveis de consolidação (Tabela 05).

Tabela 05. Níveis de cargas normais de pré-shear (W_p) e de shear (W_s) do teste de cisalhamento-JENIKE & JOHANSON(1979)

Densidade do produto (τ) (daN)	Descrição da célula		Pré-shear (daN)		Shear (daN)	
	Diâmetro (mm)	Material	W_p	W_{s1}	W_{s2}	W_{s3}
$\gamma < 300$	95	AL	7,0	4,5	3,0	1,8
$300 < \gamma < 800$	95	SS	14,0	9,5	7,0	4,0
$800 < \gamma < 1600$	95	SS	27,5	18,5	14,0	9,0
	64	SS	14,0	9,5	7,0	4,0
$1600 < \gamma < 2400$	95	SS	36,5	24,5	18,5	11,5
	64	SS	18,5	12,0	9,0	6,0
$\gamma > 2400$	64	SS	27,5	18,5	14,0	9,0
NÍVEL DE CONSOLIDAÇÃO 01						
$\gamma < 300$	95	AL	3,0	2,0	1,5	0,8
$300 < \gamma < 800$	95	SS	7,0	4,5	3,0	1,8
$800 < \gamma < 1600$	95	SS	14,0	9,5	7,0	4,0
$1600 < \gamma < 2400$	95	SS	18,5	12,0	9,0	6,0
	64	SS	9,5	6,5	4,5	2,7
$\gamma > 2400$	95	SS	27,5	18,5	14,0	9,0
	64	SS	14,0	9,5	7,0	4,0
NÍVEL DE CONSOLIDAÇÃO 02						
$\gamma < 300$	95	AL	1,5	1,0	0,6	0,3
$300 < \gamma < 800$	95	SS	3,0	2,0	1,5	0,8
$800 < \gamma < 1600$	95	SS	7,0	4,5	3,0	1,8
$1600 < \gamma < 2400$	95	SS	9,5	6,5	4,5	2,7
$\gamma > 2400$	95	SS	14,0	9,5	7,0	4,0
NÍVEL DE CONSOLIDAÇÃO 03						
$\gamma < 300$	95	AL	0,7	0,3	0,2	0,1
$\gamma < 300$	95	AL	0,7	0,3	0,2	0,1
NÍVEL DE CONSOLIDAÇÃO MÍNIMO						

4.3.1.3.4. BMHB

Escolhe as cargas normais em função das dimensões das células de cisalhamento e da densidade do produto sob vários níveis de cargas normais (Tabela 06).

4.3.1.4. Preparação da amostra

4.3.1.4.1. Enchimento da célula

Após a célula montada e ajustada na posição correta com o anel molde sobre a base da célula, ela é enchida uniformemente em pequenas camadas (Figura 35), por uma colher ou espátula sem a aplicação de uma força vertical à superfície do produto, até que uma certa quantidade de produto fique acima do topo do anel molde. O enchimento deverá ser conduzido de tal maneira que não ocorra vazios na região onde o anel e base se sobrepõem. O excesso de material é retirado em pequenas quantidades através da raspagem com uma espátula. A raspagem sobre o anel deverá ser feita com a espátula em movimentos de zig-zag e cuidados deverão ser tomados para não modificar a posição do anel sobre a base. A raspagem deve ser feita com uma espátula rígida e cortante, em posição inclinada conforme mostrado na Figura 35.

Estes procedimentos no enchimento das células são feitos em todos os testes de cisalhamento e adotados de forma geral em todos os trabalhos tomados como base (item 4).

Tabela 06 - Cargas normais de teste cisalhamento - BMHB.

Densidade do produto (τ) (daN)	Descrição da célula Diâmetro (mm)	Material	Pré-shear (daN)			Shear (daN)		
			W_p	W_{s1}	W_{s2}	W_{s3}	W_{s4}	W_{s5}
NÍVEIS DE CARGAS NORMAIS 01								
$\gamma < 300$	95	AL	1,5	1,25	1,0	0,75	0,5	0,25
$300 < \gamma < 800$	95	SS	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5
$800 < \gamma < 1600$	95	SS	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0
$1600 < \gamma < 2400$	95	SS	10,0	8,5	7,0	5,5	4,0	2,5
$\gamma > 2400$	95	SS	14,0	12,0	10,0	8,0	6,0	4,0
NÍVEIS DE CARGAS NORMAIS 02								
$\gamma < 300$	95	SS	3,25	2,75	2,25	1,75	1,25	0,75
$300 < \gamma < 800$	95	SS	7,00	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0
$800 < \gamma < 1600$	95	SS	14,00	12,0	10,0	8,0	6,0	4,0
$1600 < \gamma < 2400$	95	SS	18,50	16,0	13,5	11,0	8,5	6,0
	63	SS	10,00	8,5	7,0	5,5	4,0	2,5
$\gamma > 2400$	95	SS	28,00	24,0	20,0	16,0	12,0	8,0
	63	SS	14,00	12,0	10,0	8,0	6,0	4,0
NÍVEIS DE CARGAS NORMAIS 03								
$\gamma < 300$	95	AL	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0
$300 < \gamma < 800$	95	SS	14,0	12,0	10,0	8,0	6,0	4,0
$800 < \gamma < 1600$	95	SS	28,0	24,0	20,0	16,0	12,0	8,0
	63	SS	14,0	12,0	10,0	8,0	6,0	4,0
$1600 < \gamma < 2400$	95	SS	36,0	31,0	26,0	21,0	16,0	11,0
	63	SS	18,5	16,0	13,5	11,0	8,5	6,0
$\gamma > 2400$	63	SS	28,0	24,0	20,0	16,0	12,0	8,0

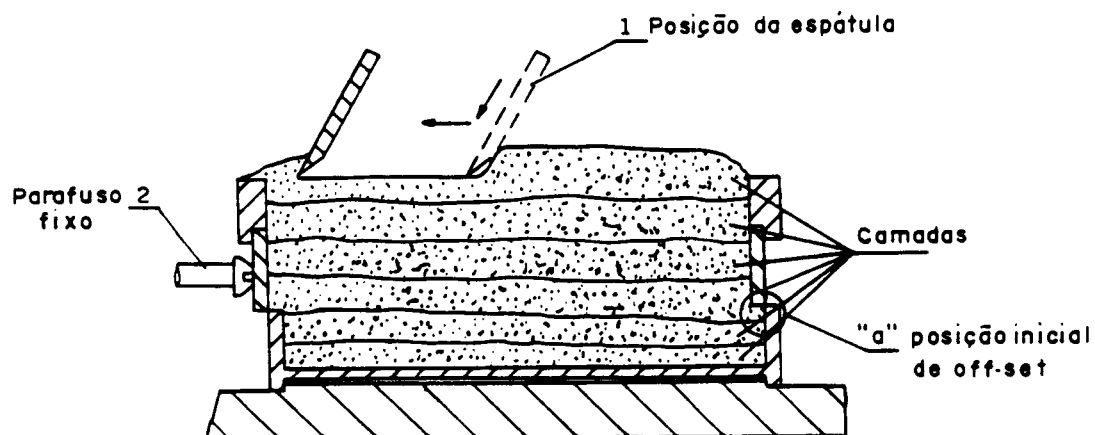


Figura 35. Enchimento e preparação da célula.

4.3.1.4.2. Consolidação da amostra

A consolidação da amostra é procedida conforme o sistema mostrado na Figura 36, e realizada com os seguintes passos:

a) colocação da tampa de operação de rotações cuidadosamente sobre a superfície nivelada do produto no anel molde, com os seus pinos alinhados com eixo longitudinal do aparelho;

b) colocação do pendural de pesos com as cargas normais de consolidação (usualmente as mesmas cargas normais usadas no pré-shear) cuidadosamente sobre o pino central da tampa de operação de rotações;

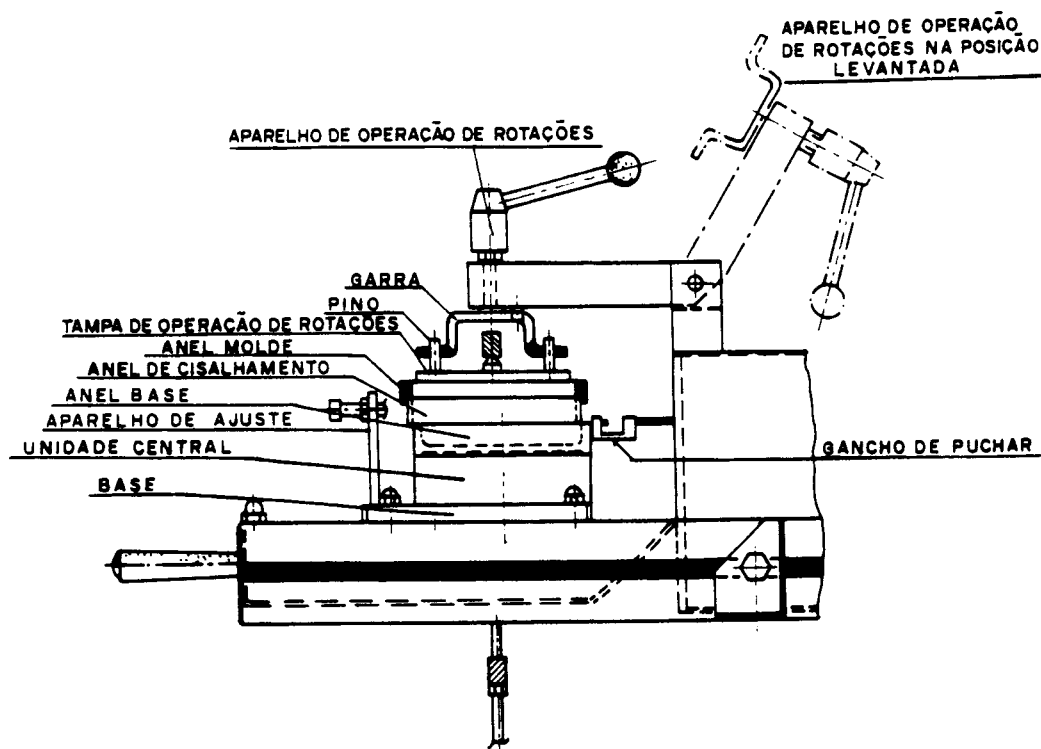


Figura 36. Sistema de consolidação da amostra.

c) no caso da tampa de operação de rotações afundar dentro do anel molde, em torno de 2 mm ou mais, deverão ser removidos o pendural de pesos e a tampa, preenchendo com o produto o espaço vazio formado no anel molde, conforme o procedimento de enchimento, descrito anteriormente (item 4.3.1.4.1.);

d) o aparelho de operação de rotações não pode transmitir nenhuma força vertical ao ser encaixado nos pinos da

tampa de operação de rotações;

e) realizar os movimentos de rotação com a alavanca do aparelho de rotações, dando a tampa uma rotação de 60 a 90°, em intervalos iguais de aproximadamente 1 segundo, com a operação de rotação suave e contínua. Durante esta operação, o anel de cisalhamento deverá ser pressionado contra os parafusos fixos para prevenir o seu deslizamento da posição original;

f) deslocar o aparelho de operação de rotações da posição superior;

g) retirar o pendural de pesos da tampa de twists cuidadosamente;

h) retirar cuidadosamente o anel molde, segurando levemente a tampa de operação de rotações sem afetar a posição original do anel de cisalhamento;

i) remover a tampa de operação de rotações, deslizando-a na direção da haste de medida da força, conservando a posição do anel de cisalhamento junto aos parafusos fixos;

j) retirar o excesso de produto em pequenas quantidades, nivelando-se com o topo do anel de cisalhamento com o mesmo procedimento adotado anteriormente, conforme mostrado na Figura 35.

Os procedimentos para consolidação das amostras descritos acima, de uma forma geral, nos testes de cisalhamento, são adotados em todos os trabalhos tomados como

base (item 4). O único ponto divergente entre eles é em relação ao número de rotações utilizados para homogenização e consolidação da amostra.

4.3.1.4.2.1. Número de rotações

4.3.1.4.2.1.1. SSTT

Adota o número de 20 a 50 rotações, dependendo do comportamento do produto na consolidação.

4.3.1.4.2.1.2. TSG 70-140

O número de rotações é definido em função da obtenção da "consolidação crítica" do produto. Para produtos difíceis (partículas grossas ou elástico) sugere o número de aproximadamente 50 rotações.

4.3.1.4.2.1.3. JENIKE & JOHANSON (1979)

Sugere a aplicação do número de 30 rotações, com o movimento de rotação da alavanca do aparelho de operação de rotações em torno de 60° .

4.3.1.4.2.1.4. BMHB

Adota o mesmo procedimento de JENIKE & JOHANSON (1979).

4.3.1.5. Otimização

Após a definição da amostra; da célula de cisalhamento; dos níveis de cargas normais (pré-shear e shear) e da preparação da amostra, antes dos testes de cisalhamento definitivos, é feita a otimização. A otimização são testes preliminares, feitos com a intenção de verificar o nível de consolidação da amostra e para que ela obtenha a "consolidação crítica".

4.3.1.5.1. Manual SSTT

Após o primeiro teste, se a amostra não estiver consolidada criticamente, pode estar em outros dois estados, a saber: - subconsolidada, o número de rotações deve ser aumentado até o limite de 50, conforme os resultados da repetição dos testes. Se depois de 50 rotações a amostra ainda permanecer subconsolidada, a tensão normal aplicada durante as rotações deve ser aumentada gradativamente de $0,5 \sigma_p$ até atingir a consolidação crítica, mantendo as 50 rotações; - sobreconsolidada, o número de rotações deve ser reduzido passo a passo, até o mínimo de 5 rotações e se a amostra ainda permanecer sobreconsolidada, reduzir o nível de tensão normal de consolidação até atingir a "consolidação crítica".

A otimização deve ser feita para cada nível de tensão normal de pré-shear.

4.3.1.5.2. TSG 70-140

A carga de pré-shear deve ser igual a de consolidação durante as rotações, mas se os testes de pré-shear mostrarem que a "consolidação crítica" da amostra não foi alcançada e dependendo dos resultados da consolidação obtidos, deve-se proceder da seguinte maneira:

- sobreconsolidada, reduzir o número de rotações ou diminuir a carga de consolidação, se ela exceder a de pré-shear;

- subconsolidada, aumentar o número de rotações ou a carga de consolidação durante a operação de rotações.

Para produtos difíceis (partículas grossas ou elástico) a obtenção da "consolidação crítica" pela máquina é limitada (espaço de 6mm da célula insuficiente para realizar o teste), e sugere procedimentos um pouco diferentes dos usuais, utilizados na consolidação e no pré-shear, os quais são destacados a seguir:

- aumentar o número de rotações em cerca de 50;

- aumentar a carga normal passo a passo em 25% antes das rotações;

- aumentar a carga normal passo a passo em 25% na consolidação e nas rotações;

- aumentar a carga normal no pré-shear através de uma pilha de pequenos pesos e remove-los um por um até alcançar a consolidação crítica;

- usar a célula de tamanho II e tentar os

diferentes procedimentos citados acima;

- parar o pré-shear antes de alcançar consolidação crítica, em cerca de 90 a 95% da esperada, obtida pela extrapolação da força de cisalhamento versus curva de tensão. Em muitos casos, isto levaria a um projeto conservativo de fluxo de massa no silo, mas o efeito de um ponto de pré-shear excessivamente baixo deve ser considerado.

4.3.1.5.3. JENIKE & JOHANSON (1979)

Para amostras subconsolidadas, sugere o aumento da carga de consolidação até atingir a "consolidação crítica".

Em amostras sobreconsolidadas, sugere a diminuição do número de rotações ou a redução da carga de consolidação até obter a "consolidação crítica".

Produtos difíceis, onde a amostra não atinge a consolidação crítica, quer seja pelo espaço insuficiente da célula (6 mm) para o cisalhamento, ou necessidade de cargas de consolidação acima de 40,5 daN, são classificados nas seguintes maneiras:

a) materiais com partículas alongadas (fibras de amianto, minerais tipo carvão xistoso, partículas extrudadas ou escamadas);

b) materiais com compactação livre (fôfo), exceto aglomerantes viscosos de partículas pequenas (plástico espumoso, papéis perfurados, floco de algodão ou finas com fraca mistura de aditivo líquido);

c) úmidos, produtos de partículas finas em umidade de saturação ou próxima (minério concentrado, bõrra de esgoto);

Quando o procedimento normal do teste com estes produtos falhar, sugere o uso de um ou a combinação dos seguintes métodos:

Método A

Com produtos tipos (a) e (b), eliminando as partículas grandes e separando antes na malha 10 e depois na 8 (ABNT).

Método B

a) encher a célula com a posição off-set no extremo em direção à haste de força;

b) aplicar uma grande carga de consolidação e a seguir iniciar o procedimento de pré-shear;

c) colocar a tampa sobre a amostra com o suporte na direção da haste de força;

d) aplicar a carga de pré-shear;

e) colocar manualmente o anel das posições extremas para a normal de off-set na direção da haste de força;

f) remover a carga de pré-shear e girar a célula de 180°, da posição normal de operação;

g) recolocar a carga de pré-shear e depois consolidar e cisalhar o produto, usando procedimento normal.

Método C

Com material tipo (a), o problema é uma

orientação das partículas. Esta orientação não necessita ser dada sob uma condição de carregamento. Uma sequência de procedimentos da orientação das partículas na direção do cisalhamento pode ser usada:

a) encher a célula de cisalhamento em camadas, raspando-as na direção do cisalhamento com uma espátula. Pré-consolidando, consolidando e cisalhando usando o procedimento normal;

b) encher a célula de cisalhamento e fazer a operação de rotações sob uma carga moderada. Remover a carga e cisalhar a amostra manualmente. Levantar o topo do anel levemente e colocá-lo para trás na posição inicial de off-set original. Repetir o cisalhamento manual e levantar o anel várias vezes para orientar as partículas no plano de cisalhamento. Consolidar e cisalhar, usando o procedimento normal.

Método D

Com os tipos (b) e (c), os métodos de trabalho são:

a) colocar o produto dentro da célula com as mãos, o quanto possível, e realizar a operação de rotações com cargas abaixo de 40,5 daN;

b) remover o aparelho de operação de rotações e o anel molde no topo, raspando-o suavemente;

c) colocar sobre a superfície raspada uma tampa SS (aço inoxidável) e aplicar uma carga normal maior do que a

especificada para pré-shear de um particular nível de consolidação. Usar 40,5 daN se necessário;

d) deixar estas cargas entre 15 e 20 minutos;

e) avançar a célula de carga usando o motor de transmissão e, com a pena do registrador levantada, remover os pesos extras gradualmente (conservar a posição com a pena levantada) até a obtenção da carga especificada de pré-shear sobre a amostra.

f) se a consolidação crítica é alcançada, cisalhar a amostra na maneira usual.

Método E

Com o produto tipo (c), se todos os procedimentos citados acima (Método D) falharem, a "consolidação crítica" da amostra pode ser obtida da seguinte maneira:

a) encher a célula e realizar as rotações com carga de consolidação igual a de pré-shear;

b) colocar a célula em uma bancada de consolidação sob uma carga 3 vezes maior que a de pré-shear, durante uma hora;

c) proceder como no teste de tempo normal para cisalhar.

4.3.1.5.4. BMHB

a) se a força de cisalhamento passar por um máximo e depois cair (amostra sobreconsolidada), refazer a consolidação da amostra reduzindo a carga da operação de

rotações e utilizar uma carga de pré-shear mais baixa;

b) se a força de cisalhamento aumentar continuamente (amostra subconsolidada), aumentar a carga de operação de rotações em 25%, mudando também a carga de pré-shear. Continuar aumentando a carga até 40 daN;

c) se a força continuar aumentando sem estabilizar, refazer a consolidação da amostra realizando a operação de rotações igual ao item b (citado acima) e iniciar o pré-shear empilhando cargas até totalizar a carga de operação de rotações. Como a força de cisalhamento s_p aumenta, remover as cargas uma de cada vez, mantendo a proporção com a medida da força de cisalhamento, até ficar só a carga de pré-shear sobre a tampa.

4.3.1.6. Teste de cisalhamento

Depois dos testes de otimização onde se obtém a carga normal para a operação de rotações e o número de rotações requeridos para obtenção da "consolidação crítica" da amostra, os testes de cisalhamento são realizados em duas etapas: pré-shear (pré-cisalhamento) e shear (cisalhamento).

4.3.1.6.1. Pré-shear

Levará a amostra a uma deformação plástica, desenvolvendo dentro dela uma zona de cisalhamento até ocorrer um fluxo de estado estável, com um valor da tensão de cisalhamento τ_p . Esta tensão de cisalhamento é mantida na

célula, embora a distância de cisalhamento seja relativamente curta (varia em função do produto). Para determinar este valor e depois de transmitir este movimento a haste de medida de força é parada e invertida, até que a mesma perca o contato com o suporte (força de cisalhamento caindo a zero).

A estabilidade dos valores da tensão de cisalhamento τ_p , obtidos em estado estável do pré-shear, são uma indicação da reprodutibilidade de consolidação. Com amostras consolidadas corretamente, os valores individuais das tensões de cisalhamento em estado estável não deverão variar mais do que $\pm 5\%$, à uma dada carga normal de pré-shear (Manual SSTT).

De uma maneira geral, os trabalhos (citados no item 4) adotam os mesmos procedimentos para teste de pré-shear, variando em relação aos níveis de cargas normais de pré-shear, conforme descrito no item 4.3.1.3.

4.3.1.6.2. Shear

Medição das forças de cisalhamento de deslizamento (τ_s) da amostra sob "consolidação crítica".

Depois do pré-shear, as cargas normais correspondentes de pré-shear são reduzidas conforme a escolha dos níveis para o teste de cisalhamento, e o cisalhamento é iniciado pela partida do motor propulsor da haste de medida de força com movimento para frente. A tensão de cisalhamento aumenta, passando por um máximo e depois diminui. O cisalhamento deverá ser contínuo, até que toda distância

sobreposta da célula tenha sido percorrida, na condição de desenvolver um plano de cisalhamento preciso.

As cargas normais devem ser removidas ou colocadas de uma maneira suave, qualquer que seja o procedimento; no pendural de cargas ou diretamente sobre a tampa (níveis de cargas normais baixos sem o pendural).

Após cada teste de cisalhamento a densidade total da amostra deve ser determinada através da pesagem da amostra com a base, anel e tampa de cisalhamento. Uma vez que os pesos da base, anel, tampa e o volume da célula são conhecidos, a densidade do produto pode ser determinada e os seus valores calculados indicarão a reprodutibilidade da preparação da amostra.

De uma forma geral, os trabalhos (citados no item 4) adotam os mesmos procedimentos para o teste de cisalhamento, variando em relação aos níveis de cargas normais (item 4.3.1.3.).

4.3.1.6.3. Avaliação dos testes de cisalhamento

4.3.1.6.3.1. Prorating

O ideal seria se todos os valores da tensão de cisalhamento de pré-shear (τ_p) para uma dada carga normal de pré-shear fossem idênticos. Isto ocorreria se a amostra fosse perfeitamente homogênea e a preparação da amostra completamente igual. Contudo, por causa da inevitável variação expe-

rimental e devido à dispersão dos valores de τ_p , quaisquer que sejam, afetam o valor da tensão de cisalhamento τ_s .

Para minimizar a dispersão, todas as medidas de tensões de cisalhamento (τ'_s), deverão ser levadas em conta na dispersão das tensões de cisalhamento de pré-shear (τ_p). Este procedimento empírico é chamado de "Prorating", e os valores rateados de τ'_s dos medidos de τ_s são avaliados usando a seguinte equação:

$$\tau_s = \tau_s \frac{\overline{\tau_p}}{\tau_p}$$

onde:

τ_p = média das tensões de cisalhamento de pré-shear obtidas dos níveis cargas normais;

τ_s e τ_p = tensões de cisalhamento de pré-shear determinadas para cada nível de carga normal.

O prorating assume que as variações na consolidação afetam as tensões de cisalhamento, e que são proporcionais às variações correspondentes da tensão de cisalhamento de pré-shear τ_p .

Os trabalhos (citados no item 4) de uma forma geral, adotam estes mesmos procedimentos.

4.3.1.6.3.2.1. Determinação dos pontos válidos de cisalhamento para construção do lugar geométrico

Para cada condição de consolidação, rateia-se e realiza-se o cálculo médio dos valores dos pontos de cisalhamento repetidos ($S_{1, i}$) e dos pontos médios de pré-shear P_i (σ_{pi} , τ_{pi}) e são plotados em um diagrama σ, τ .

Para determinar os pontos válidos da construção do lugar geométrico, alguns procedimentos são adotados, conforme os trabalhos a seguir:

4.3.1.6.3.2.1.1. SSTT

Uma linha reta é ajustada nos três maiores pontos S_2, S_3, S_4 (Figura 37). Se a linha reta passar através ou acima do ponto P (pré-shear) eles podem ser usados para maioria dos cálculos. Contudo, se a linha reta passar abaixo do ponto P (Figura 37), ela deverá ser remarcada passando através do Ponto P e reajustada para os pontos S_2, S_3 e S^4 (Figura 38) e esta linha reta deverá ser usada para a maioria dos cálculos.

Um círculo de Mohr é desenhado passando através da origem e tangencial a linha reta no ponto A (Figura 38) e o valor de σ_{tan} do ponto de tangência é determinado. Somente aqueles pontos de cisalhamento que ficaram a direita do ponto de tangência A na reta são válidos.

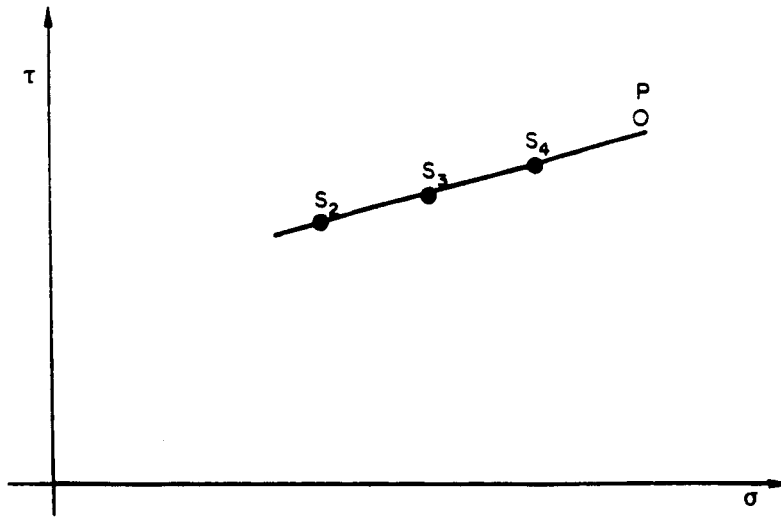


Figura 37. Pontos sobre a linha reta ajustada.

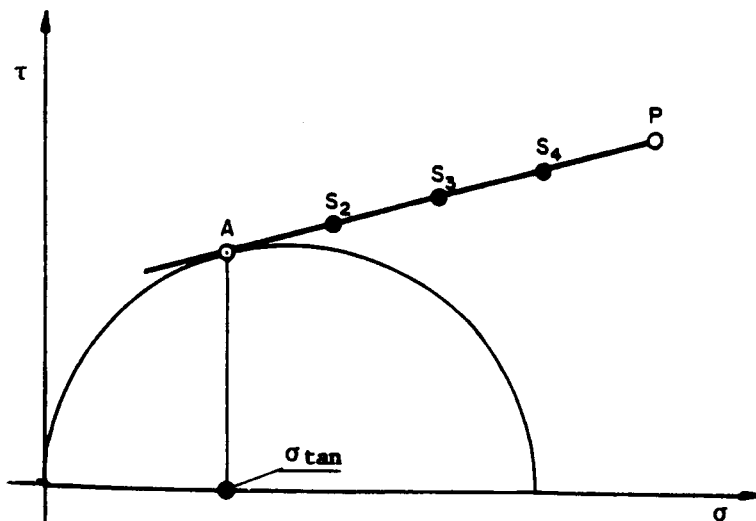


Figura 38. Pontos finais sobre a linha reta reajustada.

4.3.1.6.3.2.1.2. TSG 70-140

Os pontos de cisalhamento obtidos no pré-shear (valores médios σ_p e τ_p) e no shear (σ_{sj} e τ_{sj}) são plotados no diagrama de coordenadas σ e τ . Uma linha reta ou curva é desenhada através destes pontos, marcada excluindo o ponto de pré-shear. Aconselha o uso de um tipo de regressão para ajuste da reta. E o lugar geométrico é extrapolado para o mais alto e baixo valores da tensão normal σ_s . O ponto de pré-shear normalmente fica abaixo da linha extrapolada e não pode ficar acima.

4.3.1.6.3.2.1.3. JENIKE & JOHANSON (1979)

A Figura 39 mostra a plotagem típica da seleção e distribuição dos pontos obtidos no teste. O ponto de pré-shear P (σ_p e τ_p) deve ficar entre os pontos de tangência e o topo do círculo de Mohr de σ_1 . Se isto não ocorrer, provavelmente a amostra será subconsolidada e o valor máximo do ponto P de estado estável não será encontrado. Pontos (σ_{sj} e τ_{sj}) devem ficar entre dois pontos de tangência. Se os pontos estabelecidos ficarem fora deste limite, eles devem ser determinados novamente em uma outra carga W_p , dentro dos limites aceitáveis.

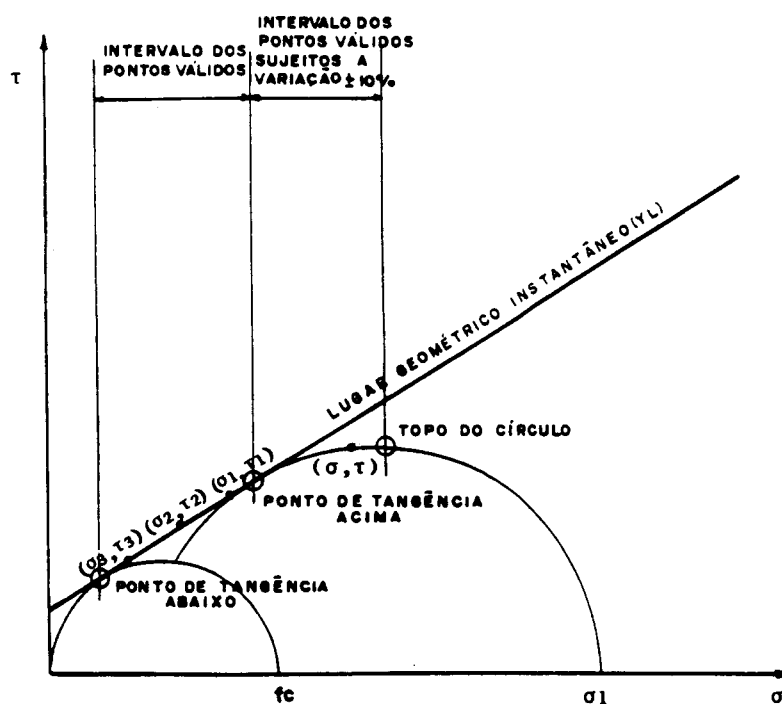


Figura 39. Pontos válidos.

4.3.1.6.3.2.1.4. BMHB

Normalmente adota 4 pontos na determinação do lugar geométrico, sendo um ponto de pré-shear $P (\sigma_p, \tau_p)$ e três de shear $S_n (\sigma_{Sn}, \tau_{Sn})$, ($n = 1, 2$ e 3). Procedendo-se similarmente com utilização de mais pontos; e realiza-se da seguinte maneira:

- a) no sistema cartesiano de coordenadas σ , τ , plotar 4 pontos;
- b) ajustar uma linha reta entre os três pontos de S_n ;

c) se o ponto P ficar abaixo da linha reta, desenhar um semi-círculo de Mohr passando pela origem e tangencial a linha reta, e determinar a abcissa σ_{tan} do ponto de tangência;

d) se o ponto P ficar acima da linha, passar a linha reta através do ponto P e refazer a linha para os pontos S_n .

4.3.1.6.3.2.2. Determinações do ângulo de atrito interno ϕ e do efetivo ângulo de atrito interno ϕ_e

Através do lugar geométrico instantâneo, definido pela linha reta, são desenhados dois círculos de Mohr:

- o primeiro é desenhado passando pela origem e tangente (no ponto A - Figura 40) ao lugar geométrico instantâneo. O ponto máximo de intersecção do círculo de Mohr com o eixo σ determina a resistência inconfina da f_c do produto;

- o segundo é desenhado passando através do ponto P (pré-shear) e tangente ao lugar geométrico instantâneo (no ponto B - Figura 40), sendo considerado válido só o círculo de Mohr com o ponto P situado a direita e coincidindo com o ponto de tangência (B). A tensão principal máxima σ_1 é definida pelo ponto maior de intersecção do círculo de Mohr com o eixo σ .

O ângulo entre o lugar geométrico e eixo σ é o ângulo de atrito interno ϕ (Figura 40). A linha reta desenhada passando através da origem e do ponto de tangência (B) do

círculo de Mohr da tensão principal máxima σ_1 , define o efetivo lugar geométrico (EYL). O ângulo entre o eixo σ e o efetivo lugar geométrico é o efetivo ângulo de atrito interno ϕ_e (Figura 40).

De uma forma geral, os trabalhos citados no item 4 adotam os mesmos procedimentos descritos para a determinação dos ângulos ϕ e ϕ_c .

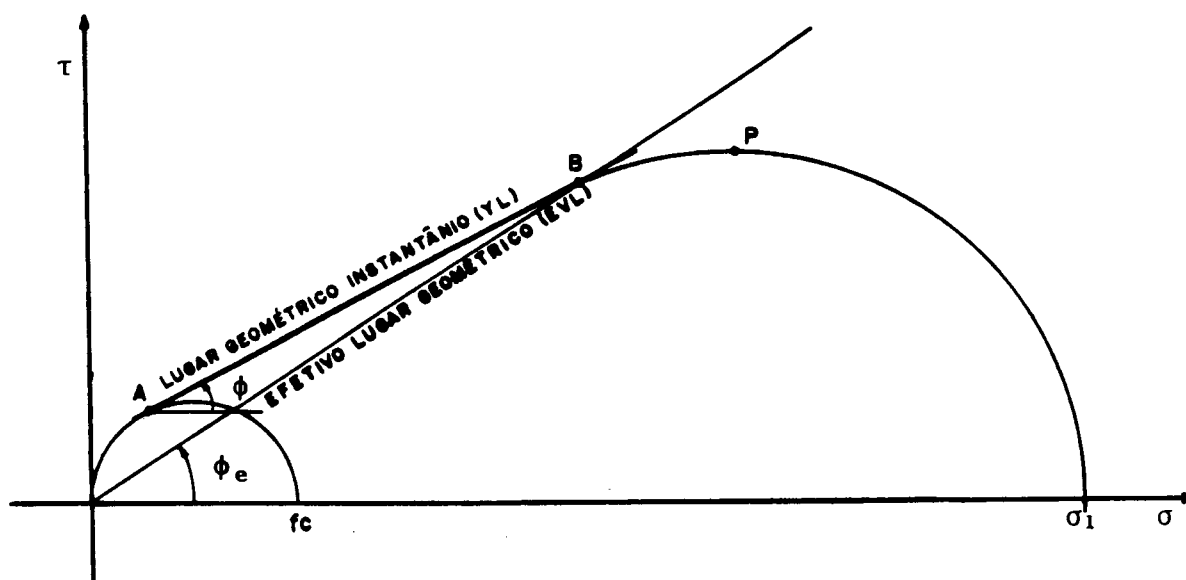


Figura 40. Lugar geométrico (YL e EYL) e ângulos de atrito interno (ϕ e ϕ_e).

4.3.1.6.3.3. Determinações das tensões normal e cisalhamento e da densidade do produto

Para cada ponto medido, as tensões normal (σ) e cisalhamento (τ) em estado estável devem ser calculadas e também a respectiva densidade (γ) do produto armazenado. Os

trabalhos de uma maneira geral, adotam as seguintes equações:

a) densidade do produto (daN/m^3);

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

b) tensões de cisalhamento de pré-shear (τ_p) e shear (τ_s), (N/m^2);

$$\tau_p = \frac{F_{s_p}}{A} \cdot g$$

$$\tau_s = \tau \cdot \frac{\bar{\tau}_p}{\tau_p}$$

$$\bar{\tau}_p = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{pi}}{n}$$

$$\tau = \frac{F_{s_s}}{A} \cdot g$$

c) tensões normais de pré-shear (σ_p) e shear (τ_s), (N/m^2).

$$\sigma_p = \frac{H + W_p + W_r + W_l + \gamma \cdot V_r}{A} \cdot g$$

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

$$\bar{\sigma}_p = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_p^i}{n}$$

onde:

W_t = peso total da célula de cisalhamento com o produto (daN);

W_b = peso da base do anel (daN);

W_r = peso do anel de cisalhamento (daN);

W_L = peso da tampa de cisalhamento (daN);

H = peso do pendural de cargas (daN);

V_t = volume total da célula de cisalhamento (m³);

V_r = volume do anel de cisalhamento (m³);

A = área da seção transversal da célula (m²);

g = constante gravitacional ($g = 9,81$);

F_{sp} = força de cisalhamento de pré-shear/estado estável (daN);

F_{ss} = força de cisalhamento de shear/deslizamento (daN);

W_p = carga sobre o pendural de pesos no pré-shear (daN);

W_s = carga sobre o pendural de pesos no shear (daN);

n = número de testes com uma carga de pré-shear W_p

4.3.2. Teste de cisalhamento com tempo de consolidação

Os testes de cisalhamento de tempo de consolidação são realizados após efetuados e analisados os

instantâneos. Nos testes de tempo, as células de cisalhamento são transferidas após a operação de pré-shear à uma bancada de consolidação, onde permanecem durante um determinado período de tempo sob a ação de uma força vertical, aplicada através de um pendural de pesos com cargas, e depois são retornadas ao aparelho para os testes de cisalhamento. Cuidados especiais devem ser tomados na transferência das células, mudança e colocação das cargas, para que as condições inicialmente impostas não sejam alteradas. As células na bancada de consolidação devem ser cobertas para evitar a variação de umidade do produto.

4.3.2.1. Preparação da amostra

Os trabalhos (citados no item 4) adotam os mesmos procedimentos do teste instantâneo.

4.3.2.2. Níveis de cargas normais dos testes de pré-shear (pré-cisalhamento) e shear (cisalhamento) com tempo de consolidação

4.3.2.2.1. SSTT

Adota os mesmos níveis de cargas normais de pré-shear utilizados nos testes instantâneos. Durante a consolidação na bancada e na operação shear, as amostras são carregadas por níveis de cargas correspondentes aos definidos no pré-shear.

4.3.2.2.2. TSG 70-140

Para a carga pré-shear (W_p) adota um valor médio das cargas de pré-shear utilizados na determinação de três lugares geométricos determinados em testes instantâneos. A consolidação da amostra na bancada é feita com a maior carga de consolidação utilizada nos testes anteriores. Os níveis de cargas de shear (W_s) são escolhidos em função do pré-shear (usualmente $W_s = 1/3 - 1/2 W_p$).

4.3.2.2.3. JENIKE & JOHANSON (1979)

Utiliza os mesmos níveis de cargas normais de pré-shear e shear dos testes instantâneos, e a consolidação da amostra na bancada é realizada com os mesmos níveis de cargas utilizados no shear.

4.3.2.2.4. BMHB

Define os níveis de cargas de pré-shear e shear iguais aos do teste instantâneo, e a consolidação da amostra na bancada é feita com os três maiores níveis de cargas utilizados no shear.

4.3.2.3. Tempo de consolidação

4.3.2.3.1. SSTT

Não define os intervalos de tempo.

4.3.2.3.2. TSG 70-140

Para a maioria dos testes, adota os seguintes intervalos de tempo: $t = 1, 2, 6, 15, 48$ e 120 horas, devendo estes intervalos serem escolhidos em função das condições impostas a cada teste; por exemplo, pelas condições de operações dos silos.

4.3.2.3.3. JENIKE & JOHANSON (1979)

Adota normalmente uma noite ou três dias, como intervalos de tempo.

4.3.2.3.4. BMHB

Não define os intervalos de tempo.

4.3.2.4. Cisalhamento (shear) da amostra depois do tempo de consolidação

4.3.2.4.1. SSTT

O cisalhamento é realizado da mesma maneira que o teste instantâneo, com a utilização de não mais do que três cargas normais, e recomenda que cada teste de tempo deve ser repetido no mínimo duas vezes.

4.3.2.4.2. TSG 70-140

Adota o mesmo procedimento dos testes instantâneos e recomenda repetir duas ou três vezes o teste de

cada intervalo de tempo.

4.3.2.4.3. JENIKE & JOHANSON (1979)

Adota os mesmos procedimentos dos testes instantâneos.

4.3.2.4.4. BMHB

Adota os mesmos procedimentos dos testes instantâneos.

4.3.2.5. Pontos válidos dos testes de cisalhamento com tempo de consolidação para a construção do lugar geométrico de tempo

4.3.2.5.1. SSTT

Marca os pontos do teste de cisalhamento de tempo nas coordenadas σ , τ , e desenha uma linha reta passando através dos pontos mais altos, paralela ao lugar geométrico instantâneo (para um particular nível de tensão normal de pré-shear). Desenha um círculo de Mohr com o ponto de maior resistência inconfina f_{ct} obtido, passando através da origem e tangencial à linha reta no ponto A_t , considerando válidos os pontos a direita do ponto de tangência (A_t). Esta linha reta é chamada de lugar geométrico de tempo TYL (Figura 41).

O ângulo formado entre o eixo σ e o lugar geométrico de tempo é o ângulo de atrito de tempo ϕ_t (Figura

41).

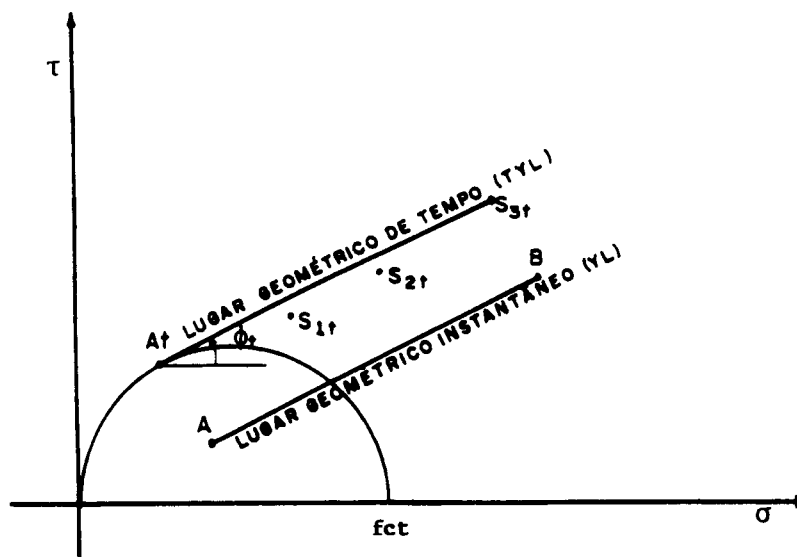


Figura 41. Pontos válidos do lugar geométrico de tempo.

4.3.2.5.2. TSG 70-140

Determina as tensões conforme os cálculos do teste de cisalhamento instantâneo e adota os seus valores máximos, de cada intervalo de tempo, como pontos válidos para construção dos lugares geométricos de tempo sendo estes tangentes aos seus respectivos círculos de Mohr de resistência inconfiada de tempo (fct_i) e paralelos ao lugar geométrico instantâneo, de acordo com a Figura 42. Não comenta a determinação do ângulo de atrito interno de tempo.

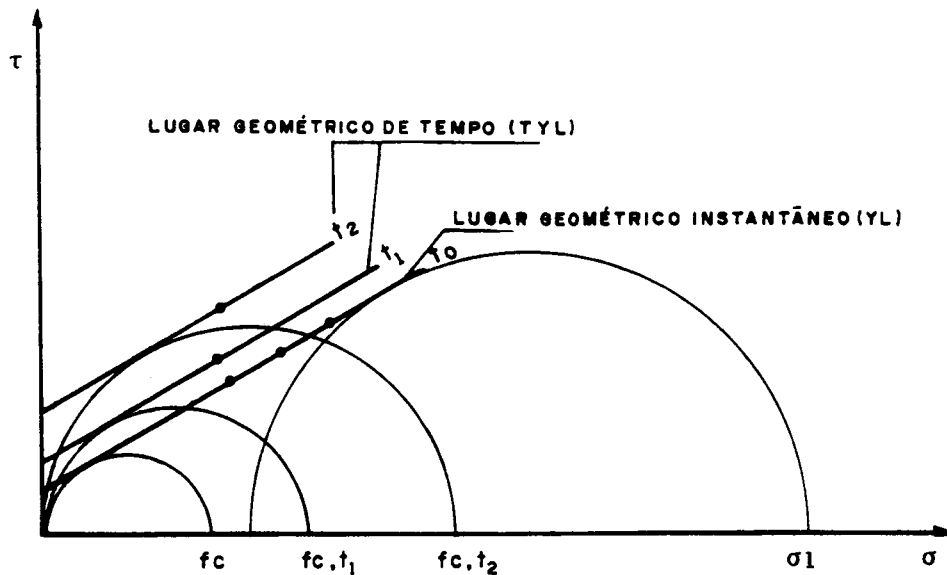


Figura 42. Lugares geométricos de tempo.

4.3.2.5.3. JENIKE & JOHANSON (1979)

Determina as tensões (σ_t , τ_t) e a força de resistência inconfiada de tempo (fct), de acordo com os cálculos do teste de cisalhamento instantâneo, construindo o lugar geométrico de tempo através dos pontos de valores máximos (σ_t , τ_t) sendo tangente ao círculo de Mohr de fct (resistência inconfiada de tempo no ponto At) e paralelo ao lugar geométrico instantâneo, conforme mostrado na Figura 43. O ângulo de atrito interno de tempo (ϕ_t) é definido pelo ângulo formado entre o eixo σ e o lugar geométrico de tempo (TYL).

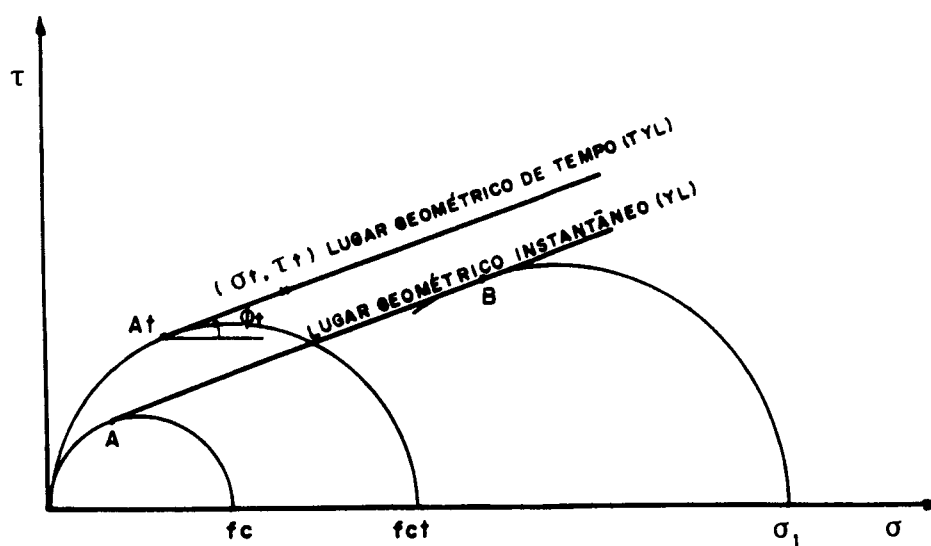


FIGURA 43. Lugares geométricos instantâneos (YL) e de tempo (TYL).

4.3.2.5.4. BMHB

Adota como ponto válido o maior valor das tensões obtidas no teste de cisalhamento com tempo de consolidação, calculados conforme o teste de cisalhamento instantâneo, e assume que o ângulo de atrito interno de tempo é igual ao do instantâneo, para construção do lugar geométrico de tempo.

4.3.2.6. Determinação das tensões do teste de cisalhamento com tempo de consolidação

De uma maneira geral, os trabalhos citados no item 4, adotam os mesmos procedimentos de cálculos do teste instantâneo.

4.3.3. Técnica do teste de cisalhamento de atrito com a parede

4.3.3.1. Escolha e preparação da amostra de material da parede para o teste

4.3.3.1.1. Escolha da amostra de material da parede

A amostra de material da parede escolhida deverá ser plana e a sua superfície representar as condições de campo sobre a qual o produto armazenado (amostra do produto escolhido de acordo com o item 4.3.1.1.) deslizará. Alguns cuidados deverão ser tomados em amostras de materiais de parede com propriedades direcionais (por exemplo madeira), orientando a amostra para que tenha a mesma direção do equipamento.

Essas recomendações, de uma maneira geral, são adotadas em todos os trabalhos citados no item 4.

4.3.3.1.2. Preparação da amostra de material da parede para o teste

Antes dos testes, as amostras de material da parede devem ser lavadas e secadas completamente, e sobre suas superfícies limpas deve-se esfregar o produto sob teste com as mãos, utilizando-se luvas (as superfícies limpas não podem sofrer contato direto com as mãos).

A amostra de material da parede deve ser calçada, de tal forma que a superfície de topo da amostra seja o plano

horizontal da haste de medida de força. O anel de cisalhamento é colocado sobre a amostra da parede e ajustado de acordo com a posição do parafuso fixo, de tal forma que permita uma passagem máxima do anel sobre a amostra durante o teste.

O anel molde é colocado sobre o anel de cisalhamento, e ambos enchidos com o produto a ser testado e o excesso é raspado e nivelado com o topo do anel molde.

A tampa de operação de rotações é colocada sobre o produto (nivelado), o pendural de pesos é colocado sobre a tampa com a carga inicial (carga máxima), e com auxílio do aparelho de operação de rotações colocado sobre a tampa realiza-se as rotações para homogeneizar e consolidar a amostra do produto. Nenhuma tensão vertical deve ser aplicada à tampa de operação de rotações pela alavanca. Depois da consolidação, o pendural com as cargas devem ser removidos cuidadosamente da tampa de operação de rotações. Depois, com ela pressionada levemente para baixo com os dedos, o anel molde é removido e, em seguida, retirada cuidadosamente da célula, deslizando-a na direção do parafuso fixo e o produto é raspado e nivelado com o topo do anel de cisalhamento.

De uma forma geral, os trabalhos (citados no item 4) adotam os mesmos procedimentos em relação a preparação da amostra; discrepam apenas em relação ao número de rotações utilizados para consolidação e homogeneização da amostra.

4.3.3.1.2.1. Número de rotações

4.3.3.1.2.1.1. SSTT

Adota o número de 20 a 50 rotações.

4.3.3.1.2.1.2. TSG 70-140

Explica que a operação de rotações não é necessária para os testes de atrito da parede, devido ao ângulo de atrito ser independente da densidade do produto.

4.3.3.1.2.1.3. JENIKE & JOHANSON (1979)

Adota o número de 30 rotações com movimento de rotação da alavanca do aparelho de operação de rotações em torno de 60° .

4.3.3.1.2.1.4. BMHB

Adota o mesmo procedimento de JENIKE & JOHANSON (1979).

4.3.3.2. Seleção da célula de cisalhamento para o teste de cisalhamento de atrito com a parede

As células utilizadas para os testes de cisalhamento de atrito com a parede, obedecem os mesmos critérios adotados na escolha dos testes de cisalhamento de instantâneo (item 4.3.1.2.) e são diferenciadas destes testes

através da substituição do anel base por uma amostra de material da parede.

4.3.3.3. Seleção dos níveis de cargas normais para os testes de cisalhamento de atrito com a parede

4.3.3.3.1. SSTT

Faz uma equivalência entre as cargas e tensões e utiliza as tensões normais. Normalmente, utiliza 6 níveis de tensões (σ_{w6} , σ_{w5} ,, σ_{w1}) para os testes, onde a maior tensão σ_{w6} deve ser aproximadamente igual a maior tensão de consolidação $\sigma_{1,2}$ da segunda tensão normal de pré-shear $\sigma_{p1,2}$. A menor tensão normal σ_{w1} , inclui o pendural de pesos sem carga.

4.3.3.3.2. TSG 70-140

Adota como nível máximo de carga normal o valor 5 daN e, a partir desse valor, os outros níveis são obtidos através da remoção sucessiva de 1 daN, até o pendural de pesos ficar sem cargas (carga mínima).

4.3.3.3.3. JENIKE & JOHANSON (1979)

Relata que o ângulo de atrito interno (ϕ_v), entre o produto e o material da parede, deve ser medido para as pressões reais que ocorrem nas paredes do silo, e recomenda os níveis de cargas normais baseados na densidade do produto

(Tabela 07).

Tabela 07 - Níveis de cargas normais para os testes de cisalhamento de atrito com a parede.

Densidade do Produto (σ) (daN/m ³)	Cargas Normais (daN)				
	W_{w1}	W_{w2}	W_{w3}	W_{w4}	W_{w5}
$\sigma < 300$	7,0	4,5	2,5	1,5	0,5
$300 < \sigma < 800$	15,0	10,0	5,0	2,0	0,5
$800 < \sigma < 1600$	15,0	10,0	5,0	2,0	0,5
$1600 < \sigma < 2400$	19,5	12,5	7,5	2,5	0,5
$\sigma > 2400$	27,5	17,5	7,5	2,5	0,5

4.3.3.3.4. BMHB

Adota os níveis de cargas normais em função de uma escala de pressões que se espera atuar nas paredes do silo. Definindo o maior nível, carga inicial, como sendo aproximadamente igual ao da maior carga de consolidação. Os testes são realizados com um número de 5 a 7 níveis de cargas, escolhidos através de reduções sucessivas da carga inicial até atingir o pendural de pesos sem cargas.

4.3.3.4. Teste de cisalhamento de atrito com a parede instantâneo

As cargas normais são colocadas sobre o pendural de pesos, selecionadas de maneira que possam ser removidas, atendendo às reduções pré-estabelecidas do nível de carga inicial do teste de cisalhamento. Inicialmente é colocado o

pendural de pesos sobre a tampa de cisalhamento, posicionada sobre a superfície nivelada do anel de cisalhamento. O próximo passo corresponde à operação de cisalhamento e antes de ligar o motor que aciona a haste de força, o anel de cisalhamento é levemente levantado (manualmente) da amostra de material da parede, para evitar que o anel se arraste com a amostra. Com o início do cisalhamento, as tensões de cisalhamento começarão a aumentar e podem alcançar um estado estável diretamente ou passar por um máximo antes de estabilizarem. A tensão máxima de cisalhamento corresponde a um atrito de parede estático, enquanto os valores de estado estável correspondem ao atrito de parede cinemático.

O teste de cisalhamento é realizado com vários níveis de cargas normais, tendo como carga inicial o valor máximo. O teste é iniciado com o nível máximo de carga, obtendo-se uma tensão máxima de cisalhamento. Quando a tensão máxima atinge um valor constante, a carga inicial é reduzida a um outro nível pré-estabelecido, com a haste de força em movimento, obtendo-se uma outra tensão de menor valor e que, ao atingir um valor constante, é registrada e novamente a carga é reduzida. Este procedimento é contínuo do começo ao fim dos níveis de cargas das selecionadas.

Se a haste de força alcançar o limite de seu percurso antes de terminar todos os níveis de cargas requeridas para o teste, ela deve ser retraída e o anel de cisalhamento ser puxado para trás cuidadosamente até a posição do parafuso

fixo, e novamente refazer o teste aumentando os níveis de cargas anteriores e anulando os resultados do primeiro teste.

No término de cada teste, a amostra de produto deve ser pesada e novamente preparada para o seguinte ensaio ou nas repetições adotadas para cada um.

Algumas vezes, há uma rápida oscilação da indicação da força de cisalhamento por causa do comportamento de "Slip-Stick" (escorrega-para). Neste caso, a tensão de cisalhamento máxima registrada durante o ensaio será usada para determinar o ângulo de atrito da parede ϕ_v .

Em muitos casos não existe uma diferença clara entre os atritos estáticos e cinemáticos. Porém, existe uma diferença significativa depois que a força de cisalhamento passa através de um máximo no início do teste de atrito da parede; por exemplo, existe um pico na tensão máxima (carga inicial) e neste caso o ângulo estático de atrito da parede pode ser determinado como a seguir:

- O teste é preparado como descrito acima exceto a parte em que a haste de força é retraída, depois que a força de cisalhamento atinge um máximo. Assim que a força de cisalhamento cair a zero, a carga sob o pendural de pesos é reduzida e a haste de força é novamente acionada. A força de cisalhamento sob este novo nível de carga outra vez passará por um máximo, e o procedimento de retrair a haste de força e reduzir a carga é repetido. Os valores de pico de τ_v são usados para determinar o ângulo de atrito da parede.

De uma maneira geral, os trabalhos (citados no item 4) adotam estes procedimentos descritos para o teste de cisalhamento de atrito.

4.3.3.5. Avaliação dos testes de cisalhamento de atrito com a parede instantâneo

4.3.3.5.1. Determinação das tensões normal e cisalhamento

Para cada nível de carga normal as tensões normal (σ_v) e cisalhamento (τ_v) devem ser calculadas, e também a densidade do produto armazenado (γ_v) no final do teste. Os trabalhos (citados no item 4), de uma maneira geral, adotam as seguintes equações:

- a) densidade do produto armazenado (daN/m³)

$$\gamma_v = \frac{W_{wt} - (W_r + W_l + W_m)}{V_I}$$

- b) tensão normal (N/m²)

$$\sigma_v = \frac{(W_{wt} + W_v - W_m)}{A} \cdot g$$

- c) tensão de cisalhamento (N/m²)

$$\tau_v = \frac{S_w}{A} \cdot g$$

onde:

- W_{wt} = peso total da amostra de parede incluindo anel de cisalhamento, tampa e produto armazenado (daN);
- W_m = peso da amostra de material da parede (daN);
- W_w = carga sobre o pendural de pesos do teste de atrito (daN);
- S_w = força de cisalhamento registrada (daN/m²)
- V_r = volume do anel de cisalhamento (m³)
- A = Área da seção transversal da célula (m²)
- W_r = peso do anel de cisalhamento (daN)
- W_L = peso da tampa de cisalhamento (daN)

4.3.3.5.2. Determinações do lugar geométrico e do ângulo de atrito da parede

4.3.3.5.2.1. SSTT

Os pontos σ_{wi} , τ_{wi} são marcados sobre as coordenadas σ , τ e uma curva suave e desenhada através dos pontos (Figura 44). Esta curva representa o lugar geométrico da parede (WYL) do particular sólido sobre o específico material da parede. A marcação do WYL pode ser linha reta ou uma curva convexa ascendente.

Se os lugares geométricos são uma linha reta passando através da origem, o ângulo de atrito da parede ϕ_w é constante, caso contrário, é feita uma associação sobrepondo o lugar geométrico da parede WYL ao círculo de Mohr da tensão

máxima de consolidação σ_1 , com o lugar geométrico instantâneo (YL), determinado dos testes de cisalhamento instantâneos de tensão normal de pré-shear σ_p (Figura 44). Dois pontos de intersecção de WYL com o círculo de Mohr são determinados e uma linha reta é desenhada passando através da origem e do ponto superior de intersecção. O ângulo que esta linha reta faz com o eixo σ é o de atrito cinemático da parede ϕ_v , nesta particular tensão máxima de consolidação σ_1 .

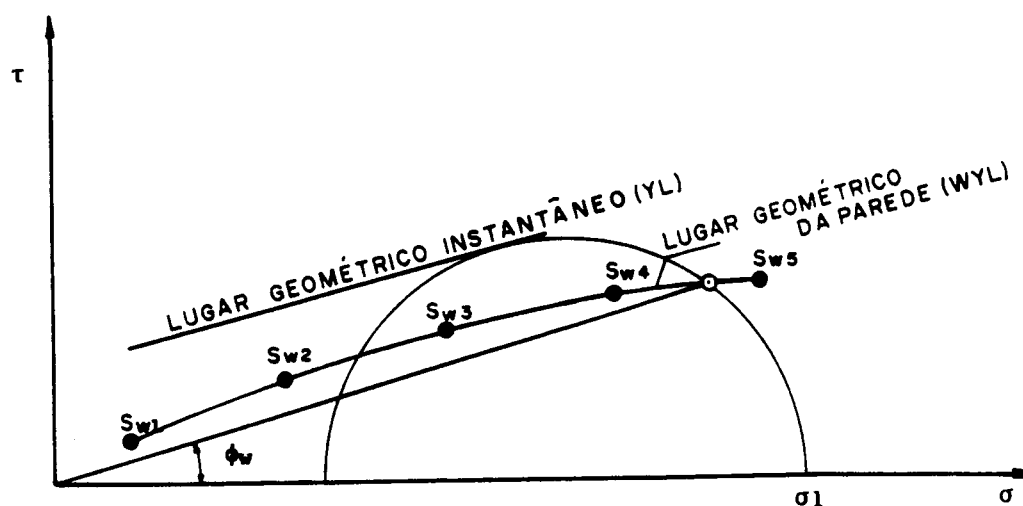


Figura 44. Lugar geométrico da parede.

Através de repetição, o procedimento com os círculos de Mohr consolidados associados com as tensões normais de pré-shear mais altas, os correspondentes valores (σ_1, ϕ_v) são obtidos para cada tensão normal de pré-shear.

O ângulo de atrito estático da parede ϕ_{vs} será

obtido quando usar os valores de picos σ_{wi} , τ_{wi} . Os valores de estado estável dão o ângulo de atrito cinemático da parede ϕ_w .

4.3.3.5.2.2. TSG 70-140

Os valores calculados de σ_{wi} , τ_{wi} são marcados no sistema de coordenadas σ_w , τ_w e os seus lugares geométricos podem ter as formas indicadas na Figura 45.

No caso do lugar geométrico da parede ser uma linha reta passando através da origem (Figura 45 - curva a), o ângulo de atrito da parede ϕ_w é constante. Em outros casos (Figura 45 - curvas b e c) o ângulo de atrito depende do nível de tensões e devem ser obtidos da seguintes equação:

$$\phi_w = \arctan \frac{\tau_w}{\sigma_w}$$

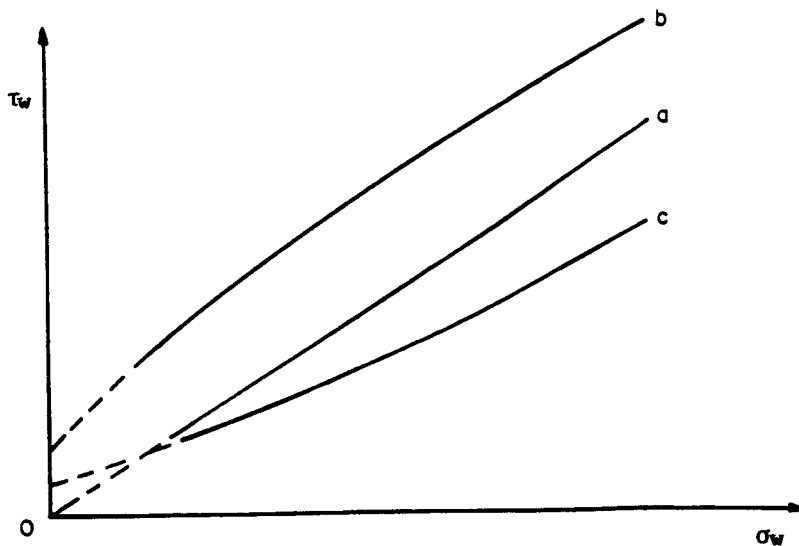


Figura 45. Possíveis formas dos lugares geométricos da parede

4.3.3.5.2.3. JENIKE & JOHANSON (1979)

Adota basicamente os mesmos procedimentos do Manual SSTT (item 4.3.3.5.2.1.).

4.3.3.5.2.4. BMHB

Adota, de uma forma geral, os mesmos procedimentos do Manual SSTT (item 4.3.3.5.2.1.)

4.3.3.6. Teste de cisalhamento de atrito com a parede com tempo de consolidação

O teste de atrito com a parede com tempo de consolidação são também conhecidos como teste de adesão. O propósito do teste é de medir a adesão de um produto na amostra de material de parede do silo depois de transcorrido com certo intervalo de tempo.

O teste normalmente é realizado com três amostras de mesmo material da parede, cortadas de modo a se encaixarem debaixo das coberturas impermeáveis da bancada de consolidação. Elas são escolhidas e preparadas de acordo com o item 4.3.3. A seleção da célula de cisalhamento para o teste é feita de acordo com o item 4.3.3.2. A seleção dos níveis de cargas normais para o teste segue o item 4.3.3.3. Os intervalos de tempo de consolidação da amostra na bancada de consolidação são adotados iguais aos do teste de cisalhamento com tempo de consolidação (item 4.3.2.3.).

O teste de cisalhamento de atrito com a parede

com tempo de consolidação é realizado com os mesmos procedimentos do teste de cisalhamento instantâneo da parede (item 4.3.3.4.), para obter uma compactação definida da amostra do produto. A haste de força é retraída e o anel é retornado novamente à posição dos parafusos fixos. A carga é aumentada para σ_{W6} e o teste de cisalhamento é realizado até que a tensão de cisalhamento alcance um valor constante. Sem parar o cisalhamento, os pesos são removidos para obter a tensão σ_{W5} . Quando a tensão de cisalhamento novamente alcançar um valor constante a haste de força é parada e retraída. Este passo pode ser considerado como a força de atrito com a parede de pré-shear que fornece a tensão inicial de cisalhamento τ_{WP5} . Os pesos e o pendural são removidos e a amostra da parede com o produto, anel e tampa são cuidadosamente colocados na bancada de consolidação sob a cobertura. Neste momento, a amostra do produto terá pequena ou nenhuma adesão ao material da parede e pode se mover levemente. Isto entretanto não invalida o teste.

Usando o pendural com os pesos apropriados, a tensão normal σ_{W5} é aplicada.

Depois de transcorrido o intervalo de tempo, a célula é transferida ao aparelho de cisalhamento e no mesmo nível de tensão normal (σ_{W5}) a amostra é cisalhada, obtendo-se a correspondente tensão de cisalhamento de atrito com a parede com tempo τ_{WT5} .

Para outras amostras, segunda e terceira, o mesmo procedimento anterior é adotado, com exceção aos níveis de

cargas pré-estabelecidas em que são submetidas para a realização do teste. A segunda amostra inicia com um nível de carga abaixo do nível da primeira em que foi obtido σ_{w5} e obtém-se σ_{w4} . Este procedimento é feito na terceira amostra para obter τ_{wt3} .

4.3.3.7. Avaliação dos testes de cisalhamento de atrito com a parede com tempo de consolidação

Os testes de cisalhamento de atrito com a parede de tempo são avaliados similarmente aos instantâneos. Os pontos (σ_{wti} , τ_{wti}) são marcados nas coordenadas σ_w , τ_w e ajustados por uma linha suave chamada de lugar geométrico da parede de tempo (TWYL). As análises dão um ângulo de atrito da parede de tempo ϕ_{wt} , para cada valor de σ_1 da sobreposição dos círculos de Mohr de estado estável.

Os trabalhos SSTT e JENIKE & JOHANSON (1979), adotam os mesmos procedimentos descritos para o teste de cisalhamento de atrito com a parede com tempo e os trabalhos TSG 70-140 e BMHB não descrevem.

4.4. Testes dos Produtos Armazenados

4.4.1. Máquina de ensaio (TRANSLATION SHEAR TESTER TSG 70-140)

A máquina de ensaio (TSG 70-140) utilizada, foi adquirida pelo Prof. Dr. Carlito Calil Jr. do Departamento de

Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos-USP, através de um convênio de pesquisa financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq -PADCT e foi instalada no Laboratório de madeiras - LAMEM.

A máquina (TSG 70-140) foi construída com base no aparelho de cisalhamento de Jenike ("Jenike Shear Cell"), tanto quanto no procedimento de teste como no princípio de cisalhamento, diferenciando-se apenas pela unidade de entrada (aparelho de empurrar) que foi trocada por uma outra (aparelho de puxar). Esta alteração de mecanismo não tem nenhuma influência sobre o processo de cisalhamento, a não ser de assegurar um perfeito alinhamento do pino de cisalhamento, célula de cisalhamento, gancho de tração, transdutor de tensões e unidade de entrada.

A máquina (TSG 70-140) foi instalada, montada, calibrada e utilizada de acordo com instruções do seu manual de operação (OPERATING INSTRUCTIONS FOR THE TRANSLATIONAL SHEAR TESTER TSG 70-140) e é constituída de três partes principais:

- P¹ - aparelho de cisalhamento (Figura 46)
- P² - aparelho registrador de tensões de cisalhamento (Figura 47)
- P³ - bancada de consolidação VFB-70 (Figura 48)

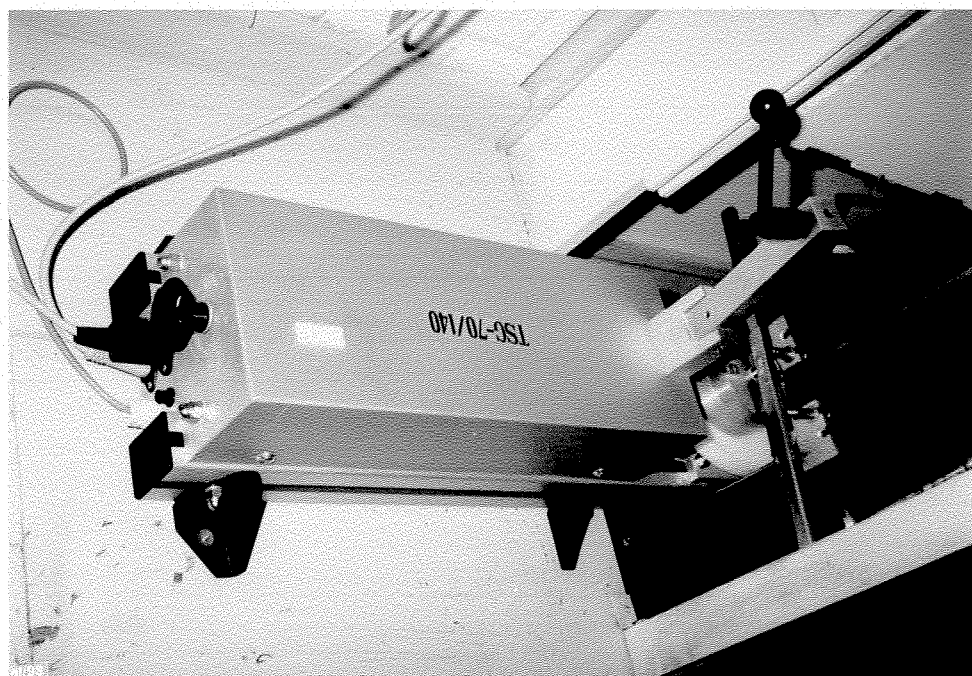


Figura 46. Vista parcial do aparelho de cisalhamento.

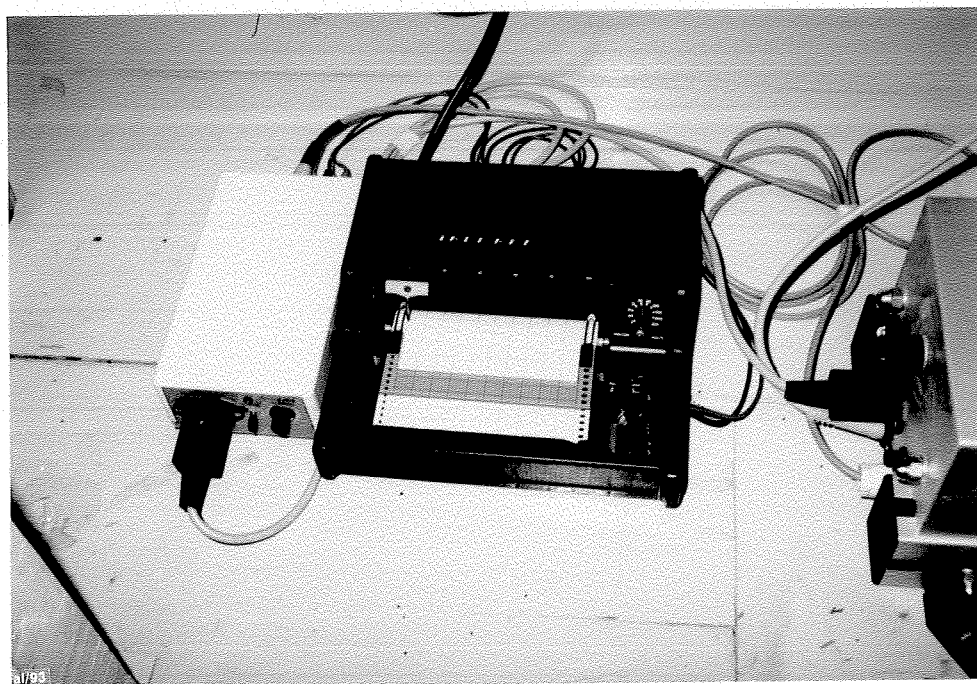


Figura 47. Vista parcial do aparelho registrador de tensões de cisalhamento.



Figura 48. Vista parcial da bancada de consolidação.

4.4.2. Ensaio

4.4.2.1. Materiais utilizados nos ensaios

4.4.2.1.1. Produto armazenado

Nos ensaios foram utilizados dois tipos de produtos armazenados, um pulverulento (farinha de trigo) e outro granular (colza), com a intenção de avaliar as determinações com produtos de comportamentos diferentes, sendo que durante o desenvolvimento de todos os ensaios utilizou-se produtos de mesma procedência e qualidade.

4.4.2.1.2. Material da parede

Para os testes, dois tipos de materiais de parede foram utilizados, um liso (aço liso) e outro rugoso (aço rugoso), com o objetivo de submeter os produtos armazenados (farinha de trigo e colza) à condições diferentes de parede e avaliar seus comportamentos nas determinações.

4.4.2.2. Tratamento estatístico

A análise estatística dos ensaios foi realizada com o objetivo de avaliar a variação dos seguintes fatores: números de rotações, níveis de cargas normais, tempo de consolidação, tipo de produto (granular, pulverulento) para definição de uma metodologia para o uso de máquina de ensaio (determinações realizadas com os produtos farinha de trigo e colza), utilizando-se esquemas fatoriais, segundo o delineamento inteiramente casualizado. Cada fator foi combinado com outros, de modo a analisar-se:

a) se os fatores atuaram independentemente (interação não significativa);

b) o efeito dos níveis dos fatores.

Para avaliar a precisão dos fatores utilizou-se o desvio padrão ou o coeficiente de variação, conforme a escolha de níveis particulares ou de ensaios.

A determinação do número de repetição de cada ensaio, foi feita através de testes preliminares, definindo-se 6 repetições para farinha de trigo e 3 para colza.

4.4.2.3. Determinação dos ensaios

4.4.2.3.1. Granulometria

A classificação dos produtos armazenados foi feita em função das dimensões do diâmetro (D) de suas partículas, baseado nas considerações de CALIL JR (1984), do seguinte modo:

$D > 0,42$ mmgranulares;

$0,42 < D < 0,149$ mm pulverulentos coesivos

$0,149 < D < 0,079$ mm pulverulentos coesivos finos;

$D < 0,079$ mm pulverulentos coesivos extrafinos.

A determinação foi feita através do método de peneiramento. O ensaio foi realizado com uma amostra de produto, previamente pesada e passada através do jogo de peneiras (ABNT - 8, 10, 16, 40, 100, 200, etc. ...), sendo a quantidade de produto retida em cada uma pesada e determinada a sua porcentagem, calculando-se as dimensões das partículas do produto como sendo o diâmetro entre as peneiras de maior porcentagem retida e a anterior.

4.4.2.3.2. Umidade

Antes e durante o período das determinações, coletaram-se amostras dos produtos armazenados (farinha de trigo e colza) para determinação de seus teores de umidade em

equilíbrio ao ar. Não foi objetivo deste trabalho avaliar a influência da variação da umidade nas propriedades de fluxo dos produtos.

O teste foi efetuado com duas repetições, utilizando-se 200 gramas de produto para cada repetição. As amostras eram colocadas em recipientes de alumínio previamente tarados, em seguida eram pesados em balança com precisão de 0,001 g para se obter o peso úmido (Pu) do produto e levados a estufa com circulação forçada de ar, à temperatura de 105°C, com uma tolerância de ±3°C, até atingirem peso constante, após o que eram resfriados em dessecador e novamente pesados, obtendo-se o peso seco (Ps). Os teores de umidade foram calculados com uso da seguinte expressão:

$$U = \frac{Pu - Ps}{Ps} \times 100$$

onde:

U = teor de umidade do produto

Pu = peso úmido da amostra do produto

Ps = peso seco da amostra do produto

4.4.2.3.3. Compressibilidade

O ensaio de compressibilidade foi realizado com a intenção de avaliar os níveis de consolidação (densidade do produto) dos produtos armazenados utilizados, com relação aos níveis de cargas normais e do número de rotações empregados na

consolidação e homogeneização da amostra.

As determinações foram feitas na máquina de ensaio utilizando-se: sistema de operação de rotações; uma célula de cisalhamento tamanho I (TSG 70-140), constituída dos anéis molde e base e de uma tampa de operação de rotações; um relógio comparador (0,01 mm) adaptado a um suporte para medir o deslocamento vertical da tampa de operação de rotações durante a variação dos níveis de cargas. A Figura 49 mostra detalhes do conjunto utilizado.

O desenvolvimento das determinações se deram das seguintes maneiras:

a) enchimento da amostra de acordo com o item 4.3.1.4.1.;

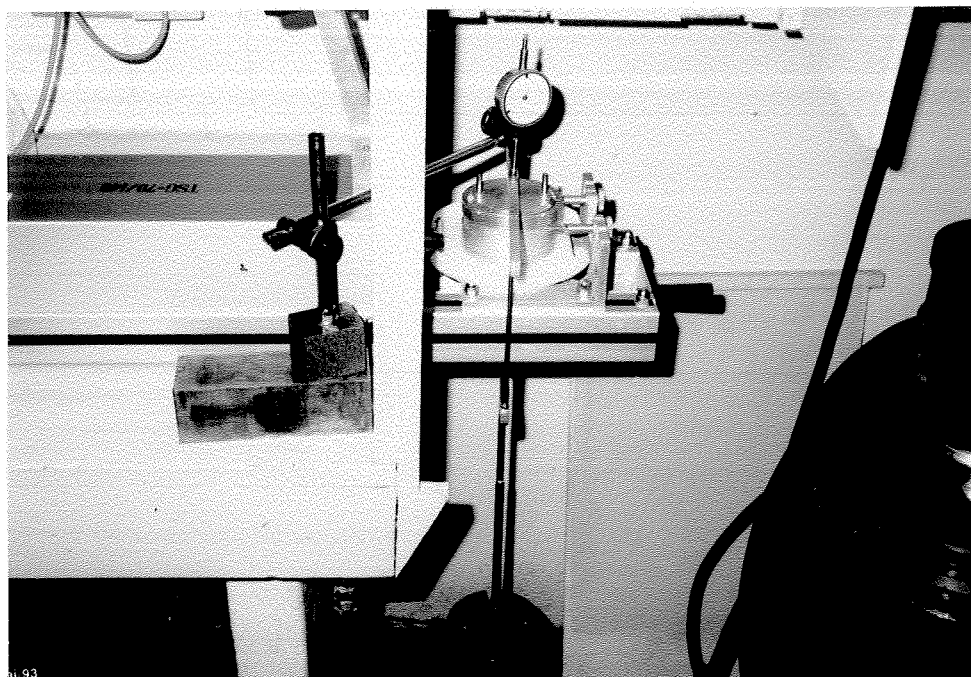


Figura 49. Vista parcial do conjunto utilizado montado.

b) colocação da tampa de operação de rotações cuidadosamente sobre a superfície nivelada do produto com o anel molde, com os pinos da tampa alinhados com o eixo longitudinal do aparelho;

c) colocação do pendural de pesos sem cargas sobre a tampa de operação de rotações;

d) posicionamento do relógio comparador sobre o pendural de pesos, tomando como referência o pino central da tampa de operação de rotações;

e) calibração do relógio comparador em zero;

f) retirada do relógio comparador;

g) colocação das cargas normais de consolidação, pré-estabelecidas, sobre o pendural de pesos;

h) posicionamento do aparelho de operação de rotações sobre a tampa;

i) realização do número de rotações estabelecidos;

j) retirada do aparelho de operação de rotações;

k) posicionamento do relógio comparador sobre o pendural de pesos, medindo-se o deslocamento da tampa de operação de rotações sobre a amostra nivelada;

l) retirada do relógio comparador e pendural de pesos com as cargas normais;

m) pesagem da célula de cisalhamento com a amostra do produto.

4.4.2.3.3.1. Níveis de cargas normais

Os níveis de cargas normais utilizados nos testes foram escolhidos em função do comportamento de cada produto armazenado, com relação as variações de suas densidades determinadas nos níveis de consolidação, em ensaios preliminares, adotando-se os seguintes níveis para cada produto:

Farinha de trigo: 0; 2,0; 4,0; 6,0; 8,0; 10,0 e 12,0 daN;

Colza: 0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0 e 10,0 daN

4.4.2.3.3.2. Número de rotações

O número de rotações adotado nos ensaios foram definidos com base nos trabalhos citados no item 4, com o objetivo de verificar o melhor valor para consolidação e homogeneização da amostra de cada produto.

Os testes foram realizados com os números de 20, 30 e 40 rotações para os dois produtos armazenados (farinha de trigo e colza).

4.4.2.3.3.3. Cálculo da densidade do produto armazenado

$$\gamma = \frac{W_t - (W_b + W_L + W_m)}{(V_b + V_m) - V_d}$$

onde:

γ = densidade do produto armazenado (daN/m³)

W_t = peso total da célula com produto (daN)

W_b = peso do anel base (daN)

W_L = peso da tampa de operação de rotações (daN)

W_m = peso do anel molde (daN)

V_b = volume do anel base (m^3)

V_m = volume do anel molde (m^3)

V_d = volume do deslocamento da tampa de operação de rotações sobre a amostra nivelada (m^3)

4.4.2.3.4. Estado estável

Os ensaios de estado estável foram feitos após as análises dos testes de compressibilidade. Tomando-se como base os resultados obtidos e os adotados nos trabalhos citados no item 4, definiu-se os valores dos níveis de cargas normais de consolidação e pré-shear e o número de rotações, que foram realizados com a intenção de verificar a variação dos seguintes resultados obtidos:

a) da consolidação crítica (densidade do produto), com relação aos níveis de cargas normais em função dos números de rotações empregados;

b) das tensões de cisalhamento obtidas no teste de pré-shear, com relação aos seus níveis de cargas normais em função dos números de rotações utilizados;

c) do valor da força de cisalhamento determinado graficamente, considerando que alguns produtos apresentam resultados com três pontos de valores máximos médios e mínimos,

conforme mostrado na Figura 50.

As determinações foram realizadas na máquina de ensaio, utilizando-se: o sistema de operação de rotações; uma célula de cisalhamento de tamanho I (TSG 70-140), constituída dos anéis de cisalhamento base e molde e das tampas de cisalhamento e de operação de rotações. Desenvolvendo-se os testes conforme os procedimentos descritos nos itens 4.3.1.4. (preparação da amostra) e 4.3.1.6.1. (teste de pré-shear).



Figura 50. Resultado gráfico obtido do aparelho registrador.

4.4.2.3.4.1. Níveis de cargas normais

Para os testes de estado estável dos produtos farinha de trigo e colza, utilizou-se os níveis de cargas normais de consolidação e pré-shear iguais, com os seguintes valores de 1,5; 3,0; 6,0 e 12,0 e 3,0; 6,0 e 12,0 daN, respectivamente.

4.4.2.3.4.2. Número de rotações

Os ensaios foram realizados com número de 20, 30 e 40 rotações para os dois produtos - farinha de trigo e colza.

4.4.2.3.5. Teste de cisalhamento instantâneo

Os testes de cisalhamento instantâneo foram efetuados depois de realizados e analisados os ensaios de estado estável. Dado ao comportamento dos resultados obtidos e os critérios usados nos trabalhos citados no item 4, adotou-se os valores dos níveis de cargas normais de pré-shear e shear e os números de rotações, empregados nos testes. Realizados com o objetivo de determinar o ângulo de atrito interno (ϕ), efetivo ângulo de atrito (ϕ_e), densidade (γ), tensão principal máxima σ_1 e resistência inconfineda (f_c) dos produtos farinha de trigo e colza, com relação aos níveis de cargas normais (de pré-shear e shear) e do número de rotações utilizados.

As determinações foram feitas na máquina de ensaio, utilizando-se a célula de cisalhamento tamanho I (TSG 70-140) tendo como base principal os procedimentos descritos nos seguintes itens: 4.3.1.1. (Escolha da amostra); 4.3.1.4. (Preparação da amostra: Enchimento da célula - 4.3.1.4.1.; Consolidação da amostra - 4.3.1.4.2.); 4.3.1.6. (Teste de cisalhamento: pré-shear - 4.3.1.6.1.; Shear - 4.3.1.6.2.); 4.3.1.6.3. (Avaliação dos testes de cisalhamento: prorating - 4.3.1.6.3.1.; Determinação das tensões normal e cisalhamento - 4.3.1.6.3.3.).

4.4.2.3.5.2. Pontos válidos do teste de cisalhamento instantâneo

A determinação dos pontos válidos de cisalhamento dos produtos foi feita através das seguintes maneiras:

a) cálculo médio dos valores obtidos das repetições dos pontos de shear e pré-shear de cada nível de consolidação;

b) plotagem dos pontos médios no diagrama de coordenadas σ e τ ;

c) construção de uma linha reta através dos pontos de shear, ajustando-a com o uso de regressão linear (LOTUS 1-2-3);

d) estudo das retas ajustadas, com a intenção de verificar os números necessários de pontos para a sua construção;

e) construção do lugar geométrico, considerando o ponto de pré-shear (σ_p , τ_p) estando contido ou abaixo da linha reta e o seu círculo de Mohr de tensão máxima σ_1 sendo tangente a reta e passando pelo ponto (σ_p , τ_p).

4.4.2.3.5.2. Níveis de cargas normais

Os níveis de cargas normais de pré-shear e shear adotados conforme descrito no item 4.4.2.3.5., utilizados nas determinações de cada produto armazenado foram os seguintes:

a) farinha de trigo: valores apresentados na Tabela 08.

Tabela 08. Níveis de cargas normais de pré-shear e shear para o teste de cisalhamento de fluxo instantâneo (farinha de trigo).

	CARGA (daN)			
	I	II	III	IV
PRÉ-SHEAR	12,0	6,0	3,0	1,5
SHEAR	9,0	4,5	2,5	1,0
	7,0	3,5	2,0	0,8
	5,0	2,5	1,5	0,6
	3,0	1,5	1,0	0,4

b) colza: valores citados na Tabela 09.

Tabela 09. Níveis de cargas normais de pré-shear e shear para o teste de cisalhamento de fluxo instantâneo.

	CARGA (daN)		
	I	II	III
PRÉ-SHEAR	12,0	6,0	3,0
SHEAR	9,0	4,5	2,5
	7,0	3,5	2,0
	5,0	2,5	1,5

4.4.2.3.5.3. Número de rotações

As determinações dos produtos farinha de trigo e colza foram realizadas com os mesmos números de rotações 20, 30 e 40.

4.4.2.3.5.4. Determinação do ângulo de atrito interno ϕ , efetivo ângulo de atrito, densidade (γ), tensão principal máxima (σ_1) e resistência inconfínada (f_c)

As determinações foram efetuadas com o auxílio de um computador (programa LOTUS 1-2-3), tomando-se como base o item 4.3.1.6.3. (Avaliação dos testes de cisalhamento), da seguinte forma:

a) cálculo das tensões normais e cisalhamento (de acordo com item 4.3.1.6.3.3.);

b) determinação do lugar geométrico instantâneo, com base nos resultados obtidos no item 4.4.2.3.5.2. (Pontos válidos do teste de cisalhamento instantâneo);

c) de acordo com o item 4.3.1.6.3.2.2. determinou-se o ângulo de atrito interno (ϕ), efetivo ângulo de atrito (ϕ_e), tensão principal máxima (σ_1) e a resistência inconfínada (f_c);

d) a densidade (γ) de acordo com o item 4.3.1.6.3.3. (Determinações das tensões normal e de cisalhamento e da densidade do produto).

4.4.2.3.6. Teste de cisalhamento com tempo de consolidação

Os testes de cisalhamento com tempo de consolidação foram realizados utilizando-se a máquina de ensaio; uma célula de cisalhamento tamanho I (TSG 70-140) e uma

bancada de consolidação (VFB-70) de 6 lugares. Efetuados com intenção de determinar a resistência inconfined de tempo, os efetivos ângulos de atrito de tempo e de compará-los com os resultados dos instantâneos. As determinações foram efetuadas tendo como base principal os procedimentos narrados nos itens 4.3.2. (Teste de cisalhamento com tempo de consolidação) e 4.3.2.1. (Preparação da amostra).

4.4.2.3.6.1. Níveis de cargas normais (pré-shear) dos testes de cisalhamento de tempo de consolidação

As cargas normais (pré-shear e shear) utilizadas foram definidas em função dos resultados dos testes instantâneos (dos níveis de cargas normais que apresentaram menores variações dos valores obtidos) e do comportamento de cada produto (farinha de trigo e colza), com relação aos níveis de consolidação em que a taxa de variação da densidade do produto começou apresentar variações constantes quando se aumentava os níveis de cargas normais de consolidação. Esta verificação foi feita através dos resultados obtidos nos testes de compressibilidade dos produtos, utilizando-se os seguintes valores:

a) Farinha de trigo:

pré-shear = 12,0 daN

shear = 9,0; 7,0 e 5,0 daN

b) Colza:

pré-shear = 3,0 daN

shear: 2,5; 2,0 e 1,5 daN

4.4.2.3.6.2. Tempo de consolidação

Para os testes foram utilizados os seguintes intervalos de tempo: $t = 6; 24; 48$ e 72 horas, com intenção de avaliar qual o melhor período para se realizar os testes.

4.4.2.3.6.3. Número de rotações

Os ensaios foram efetuados com os números de 20 e 30 rotações para a colza e a farinha de trigo, respectivamente. Esses valores foram definidos em função dos resultados obtidos dos testes de compressibilidade e cisalhamento instantâneo, correspondendo aos valores em que apresentaram menores variações com relação aos níveis de consolidação e tensões.

4.4.2.3.6.4. Pontos válidos do teste de cisalhamento com tempo de consolidação

Para a determinação dos pontos válidos do teste de cisalhamento com tempo de consolidação utilizou-se os mesmos procedimentos do Teste de cisalhamento com tempo (item 4.3.2.5.3.).

4.4.2.3.6.5. Determinação do efetivo ângulo de atrito de tempo

A determinação do efetivo ângulo de atrito de tempo foi feita segundo os mesmos critérios adotados nos testes de cisalhamento instantâneos (item 4.3.1.6.3.2.2.).

4.4.2.3.7. Teste de cisalhamento de atrito com a parede instantâneo

Os testes de cisalhamento de atrito com a parede foram realizados com base nos critérios adotados nos trabalhos citados no item 4, com relação aos níveis de cargas normais e do número de rotações. Efetuados com o objetivo de determinar e avaliar o ângulo de atrito da parede e densidade dos produtos armazenados (farinha de trigo e colza), com os materiais de parede (aços liso e rugoso), com relação aos níveis de cargas normais em função dos números de rotações empregados.

As determinações foram feitas na máquina de ensaio, utilizando-se a célula de cisalhamento tamanho I (TSG 70-140), realizadas de acordo com os procedimentos descritos nos seguintes itens: 4.3.3.1.1. - Escolha da amostra de material da parede; 4.3.3.1.2. - Preparação da amostra de material da parede para o teste; 4.3.3.4. - Teste de cisalhamento de atrito da parede e 4.3.3.5.1. - Determinação das tensões normal e cisalhamento.

4.4.2.3.7.1. Definição dos níveis de cargas normais

Os níveis de cargas normais utilizados nos ensaios de cada produto armazenado foram os seguintes:

a) Farinha de trigo:

a₁) 0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 daN;

a₂) 0; 1,5; 3,0; 6,0; 9,0 e 12,0 daN;

a₃) 0; 0,5; 2,0; 5,0; 10,0 e 15,0 daN.

b) Colza:

b₁) 0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 daN;

b₂) 0; 0,5; 2,0; 5,0; 10,0 e 15,0 daN.

4.4.1.3.7.2. Número de rotações

As determinações foram realizadas nos produtos armazenados com os seguintes números de rotações: 0, 20, 30 e 40 para a farinha de trigo e 20 para a colza, sendo que o valor de 20 foi adotado em função dos resultados obtidos nos testes de atrito da parede da farinha (onde verificou-se que o número de rotações não influi nos resultados obtidos de alguns testes preliminares com a colza com número 20, 30 e 40 rotações) e dos testes de compressibilidade da colza (em que os resultados obtidos com 20 rotações apresentaram menores variações).

4.4.2.3.7.3. Determinação do ângulo de atrito da parede instantâneo

O ângulo de atrito da parede foi determinado através dos procedimentos adotados nos itens 4.3.3.5.2.2. TSG

70-140 (referente ao item 4.3.3.5.2. Determinações do lugar geométrico e do ângulo de atrito da parede), para os dois produtos armazenados. Estes procedimentos foram escolhidos dada as análises feitas com os resultados obtidos, com auxílio de um computador utilizando-se um programa chamado "Ajuste de Equações em Dados Experimentais" (Boletim Técnico - 1987 - Instituto Agronômico de Campinas-SP), verificando-se o comportamento dos pontos obtidos com relação a equação que melhor se adapta, curva ou reta.

4.4.2.3.8. Teste de cisalhamento de atrito com a parede com tempo de consolidação

Os testes de cisalhamento de atrito com a parede com tempo de consolidação foram efetuados utilizando-se: a máquina de ensaio, uma célula de cisalhamento tamanho I (TSG 70-140) e uma bancada de consolidação (VFB-70) de 6 lugares. Realizados com o objetivo de determinar os ângulos de atrito com a parede com tempo de consolidação, dos produtos farinha de trigo e colza e dos materiais de parede aços liso e rugoso, e de compará-los com os resultados dos instantâneos.

As determinações foram feitas seguindo os mesmos procedimentos adotados nos itens 4.3.3.6. (Teste de cisalhamento de atrito com a parede com tempo), diferenciando-se nos seus procedimentos adotados com relação a seleção dos níveis de cargas normais (4.3.3.3.), intervalos de tempo de consolidação (4.3.2.3.).

4.4.2.3.8.1. Níveis de cargas normais

Os níveis de cargas normais foram definidos em função dos resultados obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede instantâneo e do comportamento de cada produto armazenado, onde constatou-se que a partir de um certo nível de carga normal os resultados dos ângulos de atrito da parede sofriam pequenas variações dos seus valores, alcançando uma certa estabilidade.

Para as determinações utilizou-se os seguintes níveis de cargas normais:

a) Farinha de trigo:

15,0; 12,0; 10,0 e 5,0 daN;

b) Colza

5,0; 4,0; 3,0 e 2,0 daN.

4.4.2.3.8.2. Número de rotações

O número de rotações utilizados nas determinações foram fixados em função do comportamento dos produtos armazenados, com relação aos resultados obtidos nos testes de cisalhamento de atrito com a parede instantâneo (onde verificou-se que o número de rotações não influi nos resultados obtidos) e de compressibilidade (onde determinou-se o melhor número de rotações para homogeneização e consolidação da amostra). Os valores adotados foram os seguintes:

a) Farinha de trigo - 30 rotações

b) Colza - 20 rotações

4.4.2.3.8.3. Tempo de consolidação

Os testes de atrito da parede com tempo de consolidação foram efetuados com o período de 6 horas para os produtos armazenados farinha de trigo e colza. Este valor de tempo foi fixado em função dos resultados obtidos nos testes de cisalhamento de tempo.

4.4.2.3.8.4. Determinação das tensões normal e cisalhamento dos testes de cisalhamento de atrito com a parede com tempo de consolidação

As determinações foram efetuadas utilizando-se os mesmos procedimentos adotados nos testes de cisalhamento de atrito com a parede instantâneo.

4.4.2.3.8.5. Determinação do ângulo de atrito com a parede com tempo de consolidação (ϕ_{rt})

O ângulo de atrito da parede com tempo de consolidação foi determinado de acordo com o item 4.4.2.3.6.2.

- Determinação do ângulo de atrito com a parede instantâneo.

4.4.3. Definição do número de repetições necessários para a realização dos ensaios dos produtos farinha de trigo e colza

Através dos resultados com menores variações obtidos em cada teste e com a utilização da fórmula do erro

para estimativa da média:

$$\text{erro} = 2 \frac{S}{\sqrt{r}}$$

onde:

S = desvio padrão médio

r = número de repetições

foram determinados os números de repetições necessários para cada teste, considerando um intervalo com confiança de 95% para a média verdadeira.

No trabalho, o erro foi tomado como 5% da média.

4.4.4. Análise comparativa dos resultados obtidos nos testes com critérios adotados nos trabalhos citados no item 4 (Determinação das Propriedades de Produtos Armazenados)

Dos resultados obtidos nos testes, com os produtos farinha de trigo e colza, foi feita uma análise comparativa com base nos critérios adotados nos trabalhos citados no item 4, com a intenção de verificar quais critérios podem ser utilizados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados e discutidos a seguir os resultados do presente estudo, os quais obedecem a sequência em que foram obtidos.

5.1. Teste de Granulometria

Os resultados obtidos no ensaio de granulometria dos produtos armazenados farinha de trigo e colza são apresentados na Tabela 10. Da análise dos valores determinados verificou-se que, a farinha de trigo e a colza tiveram suas maiores porcentagens retidas (86,08 e 86,58%) nas peneiras de números 100 (0,149 mm) e 16 (1,19 mm), respectivamente; obtendo-se um diâmetro (D) das partículas da farinha de trigo de $0,42 < D < 1,19$ mm e para colza $2,00 < D < 1,19$ mm. Segundo CALIL JR. (1984) - item 4.4.2.3.1., a farinha de trigo classifica-se como um produto pulverulento coesivo e a colza

como granular.

TABELA 10. Resultados obtidos do ensaio de granulometria dos produtos farinha de trigo e colza.

Produto Armazenado	Número das Peneiras (Diâmetro-mm)	% de Produto Retido nas Peneiras	% de Produto Retido no Fundo
Farinha de Trigo	100 (0,149)	86,08	
	200 (0,074)	9,50	2,10
	230 (0,062)	2,32	
Colza	10 (2,00)	10,88	
	16 (1,19)	86,58	1,60
	40 (0,42)	2,38	

5.2. Teste de Umidade

Visando a obtenção dos teores de umidade dos produtos farinha de trigo e colza, antes e durante as determinações, realizou-se os ensaios de umidade e verificou-se que:

a) a farinha de trigo apresentou um teor de umidade médio de 12,0% com uma variação de $\pm 2,0\%$, nos ensaios realizados;

b) para a colza determinou-se um valor médio do teor de umidade de 4,0%, com uma variação de $\pm 0,5\%$;

c) a maior variação do teor de umidade ocorreu com a farinha de trigo, demonstrando ser um produto que absorve rapidamente a umidade ambiente.

Para que pudesse impedir grandes variações nos teores de umidade dos produtos armazenados, interferindo nos resultados dos ensaios, realizou-se as determinações evitando

dias chuvosos com grande variação da umidade relativa do ar.

5.3. Teste de Compressibilidade

Apresentam-se nas Tabelas 11 e 12, os valores da densidade média e do desvio padrão dos resultados obtidos nos testes de compressibilidade dos produtos farinha de trigo e colza, respectivamente.

TABELA 11. Valores da densidade média e do desvio padrão dos resultados obtidos nos testes de compressibilidade da farinha de trigo (6 repetições).

Nº de Rotações	Carga Normal daN	Densidade Média daN/m ³	Desvio Padrão
20	0	694,61	11,89
	2	789,24	27,11
	4	870,60	34,76
	6	934,64	66,76
	8	1013,18	81,53
	10	1093,70	109,08
	12	1226,74	184,75
30	0	717,75	9,25
	2	793,28	41,41
	4	831,20	47,42
	6	864,28	51,87
	8	891,33	49,59
	10	919,69	60,29
	12	953,55	53,43
40	0	705,48	10,77
	2	785,59	33,62
	4	899,99	90,72
	6	955,92	114,33
	8	1029,13	137,63
	10	1084,89	153,60
	12	1139,09	181,91

TABELA 12. Valores da densidade média e do desvio padrão dos resultados obtidos nos testes de compressibilidade do produto colza (03 repetições).

Nº de Rotações	Carga Normal daN	Densidade Média daN/m ³	Desvio Padrão
20	0	585,44	0,98
	1	596,96	1,12
	2	600,81	1,68
	3	602,53	2,05
	4	603,99	2,37
	5	605,08	2,58
	6	605,72	2,65
	7	606,73	2,61
	8	607,74	2,84
	9	609,14	3,00
	10	610,44	3,17
30	0	585,22	5,59
	1	598,25	5,10
	2	600,67	5,17
	3	602,48	4,75
	4	603,81	5,50
	5	604,66	4,99
	6	605,58	5,18
	7	606,32	5,73
	8	607,15	5,72
	9	607,70	5,52
	10	608,35	6,16
40	0	586,12	9,91
	1	595,78	10,09
	2	598,19	9,94
	3	599,90	10,14
	4	601,08	10,65
	5	602,25	9,73
	6	603,07	9,57
	7	603,89	19,96
	8	604,71	9,87
	9	605,63	10,03
	10	606,37	9,62

As Figuras 52 e 53, construídas a partir dos dados das Tabelas 11 e 12 dos produtos farinha de trigo e colza, respectivamente, apresentam os valores da densidade média relativa a cada nível de carga normal em função do número de rotações utilizados.

Na Figura 52 (farinha de trigo) observa-se que:

- os valores da densidade média obtidos com o número de 30 rotações foram inferiores aos outros de 20 e 40, com exceção dos níveis de cargas normais 0 e 2 daN, em que apresentou valor superior e igual, respectivamente, demonstrando a influência do número de rotações;

- as densidades médias determinadas com o número de 40 rotações apresentaram maiores valores, com exceção dos níveis de cargas 0, 2, 10 e 12 daN, em que apresentou valor inferior ou igual;

- dos valores da densidade média obtidos, constata-se que o número de rotações (20, 30 e 40) utilizados influem nos resultados, com exceção do nível de carga 2 daN.

Para a Figura 53 (colza), observa-se que os valores da densidade média obtidos com os números de 20, 30 e 40 rotações, com relação aos níveis de cargas normais, foram praticamente os mesmos, apresentando os de 40 rotações resultados um pouco inferior aos outros, com diferenças mínimas. Portanto, constata-se que os números de rotações 20, 30 e 40 não influem nos valores da densidade média obtidos.

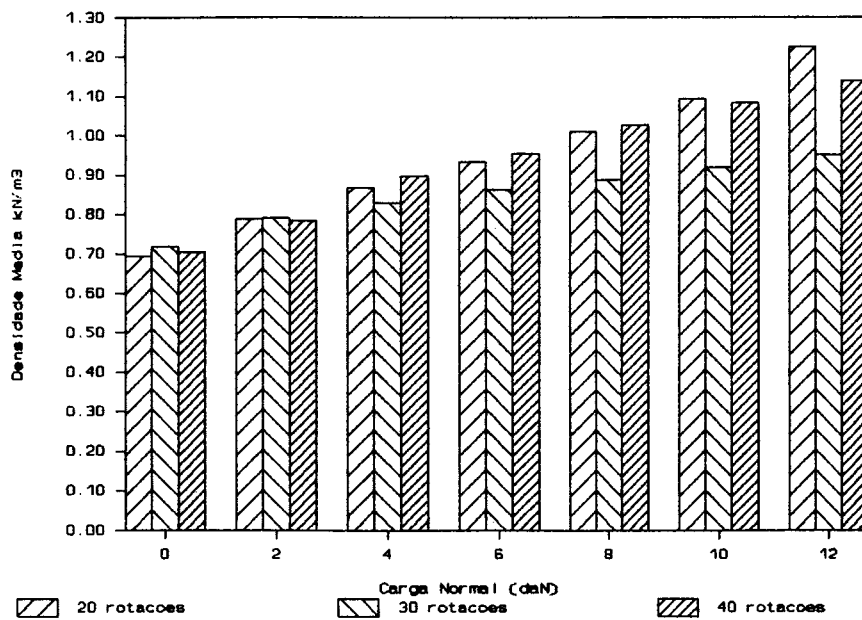


FIGURA 52. Valores da densidade média dos testes de compressibilidade da farinha de trigo.

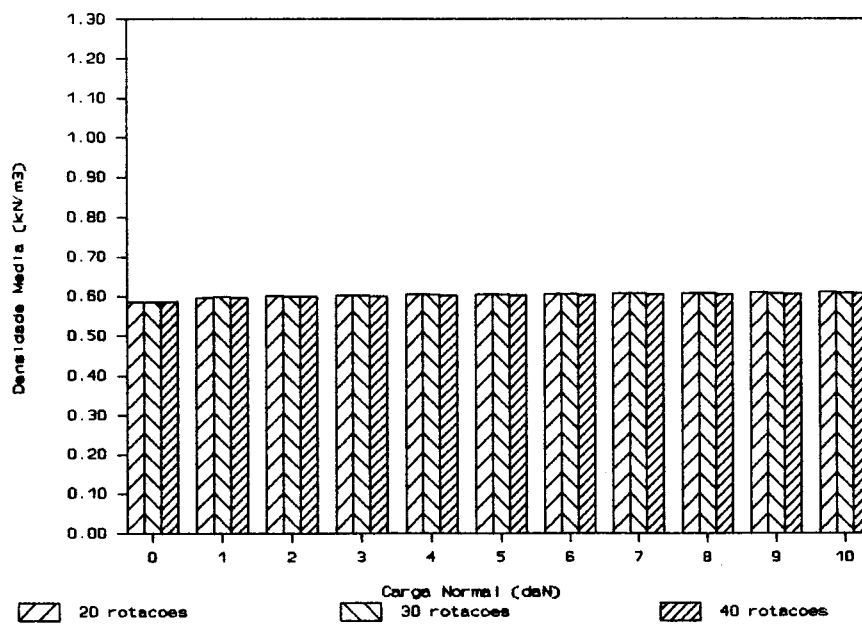


FIGURA 53. Valores da densidade média dos testes de compressibilidade da colza.

As Figuras 54 e 55, construídas a partir dos dados das Tabelas 11 e 12 dos produtos farinha de trigo e colza, respectivamente; mostram os desvios padrões dos valores da densidade média relativos a cada nível de carga normal em função do número de rotações utilizados.

Na Figura 54 (farinha de trigo) observa-se que, os valores das densidades médias determinados com o número 30 rotações apresentaram-se, no geral, menores desvios padrões e que os determinados com 40 rotações os maiores desvios. Portanto, constata-se que os valores da densidade média obtidos com número de 30 rotações são mais homogêneos (resultado com maior repetibilidade).

Para a Figura 55 (colza) observa-se que, no geral, os valores das densidades médias determinados com o número de 20 rotações apresentaram menores desvios padrões e os com 40 rotações os maiores desvios, indicando que os valores da densidade média obtidos com o número de 20 rotações são mais homogêneos.

A Tabela 13 apresenta um resumo dos valores das análises estatísticas realizadas com os resultados obtidos nos testes de compressibilidade dos produtos farinha de trigo e colza.

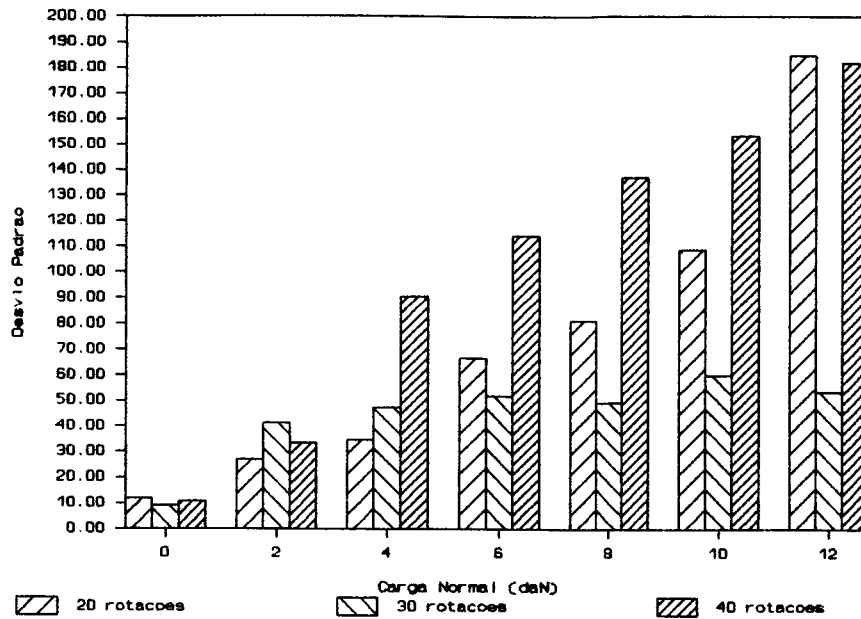


FIGURA 54. Desvios padrões dos resultados da densidade média dos testes de compressibilidade da farinha de trigo.

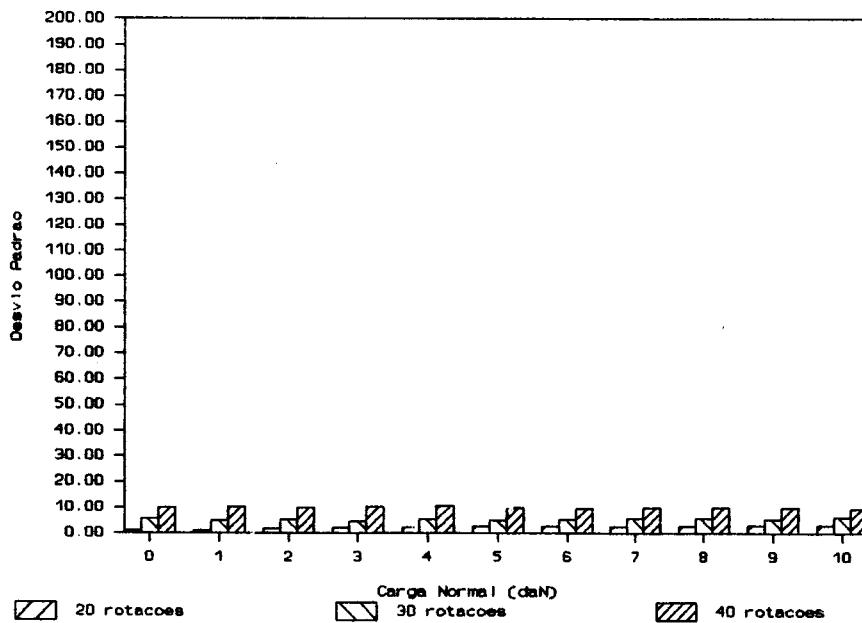


FIGURA 55. Desvios padrões dos resultados da densidade média dos testes de compressibilidade da colza

TABELA 13. Resultados das análises estatísticas, dos testes de compressibilidade dos produtos farinha de trigo e colza.

Estatísticas da Análise de Variância	Produtos	
	Farinha de Trigo	Colza
F (rotações)	14,22 ^{**}	1,33 NS
F (carga normal)	42,31 ^{**}	8,36 ^{**}
F (interação: rotações x carga normal)	2,28 [*]	0,04 NS
Média Geral (daN/m ³)	913,99	602,17
Desvio Padrão	90,78	6,69
Coefficiente de Variação	9,93	1,11

* - significativo a nível de 5% de probabilidade

** - significativo a nível de 1% de probabilidade

Dos valores apresentados na Tabela 13 constata-se que:

- com relação aos números de rotações (20, 30 e 40) utilizados, os valores de F obtidos para a farinha de trigo (14,22^{**}) foram significativos e as diferenças nos números de rotações podem ser notadas na Figura 52 e para a colza (1,33 NS) foi não significativo (Figura 53).

- os valores de F obtidos dos produtos farinha de trigo (42,31^{**}) e colza (8,36^{**}) com relação aos níveis de cargas normais foram significativos e as diferenças nos níveis de cargas normais podem ser vistas nas Figuras 52 (farinha de trigo) e 53 (colza);

- da interação entre o número de rotações (20, 30

e 40) e os níveis de cargas normais, os valores de F obtidos para o produto farinha de trigo ($2,28^*$), diferiram significativamente, mostrando que o efeito das cargas normais não é o mesmo em todas rotações e, para a colza (0,04 NS) foi não significativo;

- os valores da média geral dos produtos farinha de trigo e colza foram 913,99 e 602,17 daN/m³, respectivamente;

- os valores dos desvios padrões médios dos resultados obtidos nos testes de compressibilidade para os produtos farinha de trigo e colza foram 90,78 e 6,69, respectivamente;

- os valores do coeficiente de variação obtidos para os testes de compressibilidade dos produtos farinha de trigo e colza foram 9,93 e 1,11, respectivamente, indicando que os produtos pulverulentos (farinha de trigo) possuem variâncias (ou seja, variabilidade) bem maiores que os granulares (colza), mantendo idênticas as condições dos testes para os dois produtos.

5.4. Teste de Estado Estável

Inicialmente, no ensaio de estado estável analisou-se os valores das forças de cisalhamento dos produtos farinha de trigo e colza, determinados graficamente através do aparelho registrador. Dos resultados obtidos das forças de cisalhamento constatou-se que:

- a farinha de trigo registrou três valores para

cada nível de carga normal (pré-shear), caracterizados como F_{s1} (máximo), F_{sm} (médio) e F_{s2} (mínimo) e seus valores médios (6 repetições) e dos desvios padrões, são apresentados nas Tabelas 14, 15 e 16, respectivamente;

- a colza registrou apenas um valor (F_s) para cada nível de carga normal (pré-shear), sendo apresentado na Tabela 17 o seu valor médio e desvio padrão.

As Figuras 56, 57, 58 e 59, construídas a partir dos dados das Tabelas 14 (F_{s1}), 15 (F_{sm}), 16 (F_{s2}) e 17 (F_s) dos produtos farinha de trigo e colza, respectivamente, apresentam os valores de força de cisalhamento média relativa a cada nível de carga normal (pré-shear) em função do número de rotações utilizadas.

TABELA 14. Valores da força de cisalhamento F_{s1} (máximo) média e do desvio padrão dos resultados obtidos nos testes de estado estável da farinha de trigo (6 repetições)

Número de Rotações	Carga Normal Pré-Shear (daN)	Força de Cisalh. Média (daN)	Desvio Padrão
20	1,50	1,52	0,22
	3,00	2,55	0,28
	6,00	4,64	0,35
	12,00	8,51	0,45
30	1,50	1,61	0,11
	3,00	2,53	0,12
	6,00	4,57	0,35
	12,00	8,19	0,51
40	1,50	1,66	0,17
	3,00	2,58	0,21
	6,00	4,33	0,56
	12,00	8,87	0,34

TABELA 15. Valores da força de cisalhamento F_{SR} (médio) média e do desvio padrão dos resultados obtidos nos testes de estado estável da farinha de trigo (6 repetições)

Número de Rotações	Carga Normal Pré-Shear (daN)	Força de Cisalh. Média (daN)	Desvio Padrão
20	1,50	1,51	0,21
	3,00	2,52	0,22
	6,00	4,52	0,31
	12,00	8,17	0,25
30	1,50	1,60	0,01
	3,00	2,51	0,08
	6,00	4,41	0,20
	12,00	7,87	0,30
40	1,50	1,63	0,16
	3,00	2,57	0,18
	6,00	4,24	0,46
	12,00	8,45	0,12

TABELA 16. Valores da força de cisalhamento F_{S2} (mínimo) média e do desvio padrão dos resultados obtidos nos testes de estado estável da farinha de trigo (6 repetições)

Número de Rotações	Carga Normal Pré-Shear (daN)	Força de Cisalh. Média (daN)	Desvio Padrão
20	1,50	1,51	0,20
	3,00	2,48	0,16
	6,00	4,39	0,35
	12,00	7,83	0,45
30	1,50	1,58	0,10
	3,00	2,48	0,07
	6,00	4,26	0,20
	12,00	7,54	0,43
40	1,50	1,61	0,15
	3,00	2,56	0,15
	6,00	4,15	0,38
	12,00	8,04	0,47

TABELA 17. Valores da força de cisalhamento F_s média e do desvio padrão dos resultados obtidos nos testes de estado estável da colza (3 repetições)

Número de Rotações	Carga Normal Pré-Shear (daN)	Força de Cisalh. Média (daN)	Desvio Padrão
20	3,00	2,28	0,01
	6,00	4,08	0,21
	12,00	7,82	0,22
30	3,00	2,27	0,13
	6,00	4,36	0,08
	12,00	7,94	0,13
40	3,00	2,42	0,05
	6,00	4,20	0,06
	12,00	7,68	0,29

Nas Figuras 56 (F_{s1}), 57 (F_{sm}) e 58 (F_{s2}) - farinha de trigo observa-se que:

- os valores da força de cisalhamento média para os resultados de F_{s1} (máximo), F_{sm} (médio) e F_{s2} (mínimo) tiveram o mesmo perfil com relação aos níveis de cargas normais (pré-shear);

- as forças de cisalhamento média (F_{s1} , F_{sm} e F_{s2}) determinadas com o número de 40 rotações, apresentaram valores ligeiramente maiores, com exceção do nível de carga normal 6 daN, em que apresentou valor inferior aos outros (20, 30);

- dos valores da força de cisalhamento média (F_{s1} , F_{sm} e F_{s2}) obtidos, constata-se que o número de rotações influenciou nos resultados, mas seu efeito é pequeno (predomina o efeito da carga normal).

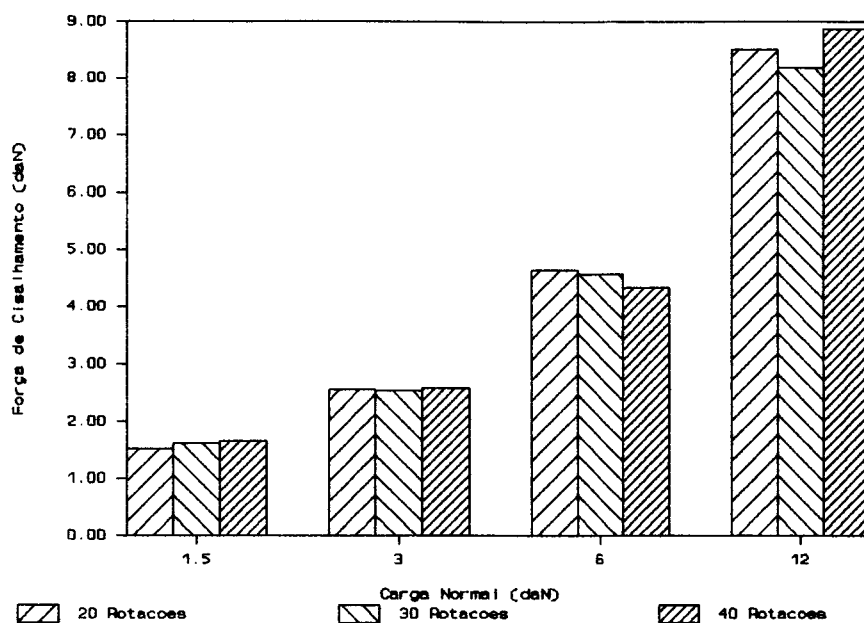


FIGURA 56. Força de cisalhamento média (F_{s1}) dos testes de estado estável da farinha de trigo.

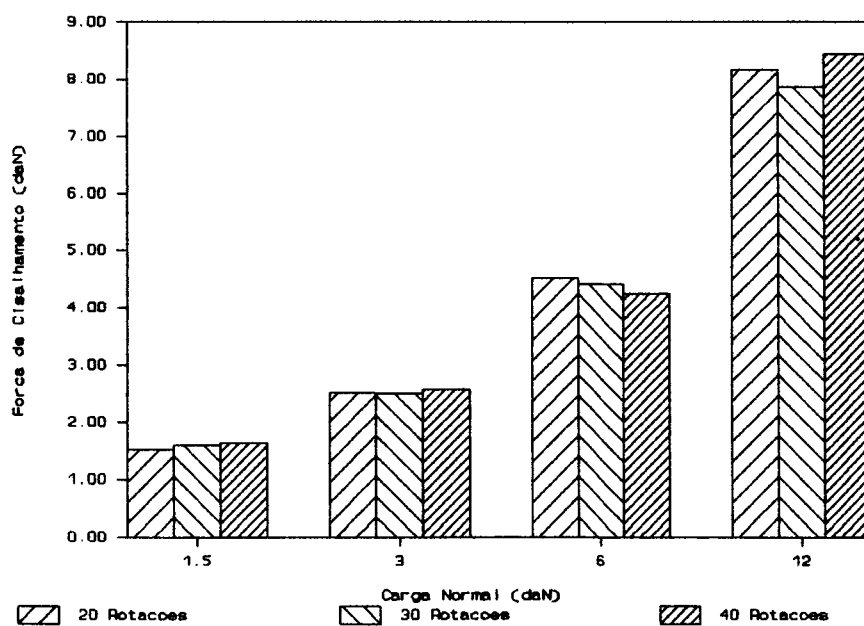


FIGURA 57. Força de cisalhamento média (F_{sm}) dos testes de estado estável da farinha da trigo.

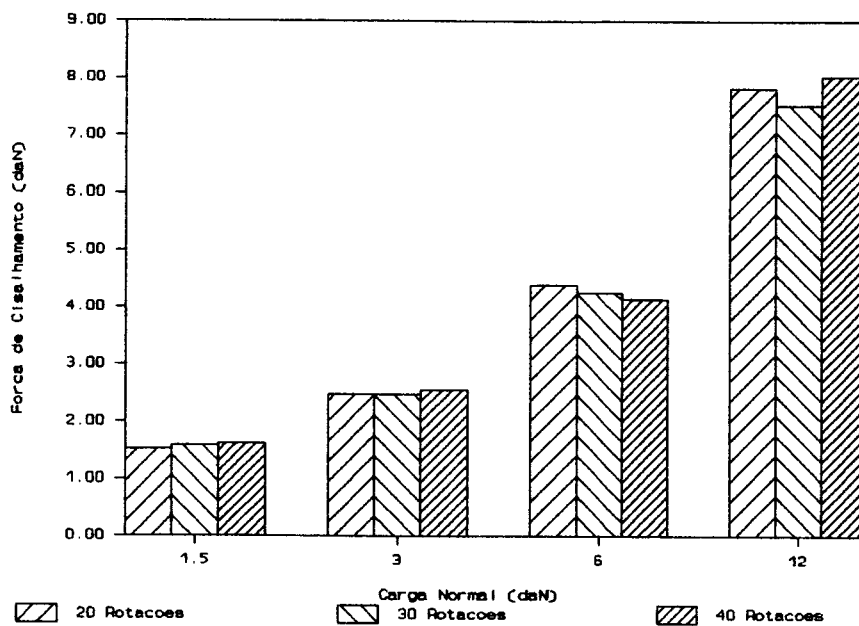


FIGURA 58. Força de cisalhamento média (F_{s2}) dos testes de estado estável da farinha de trigo.

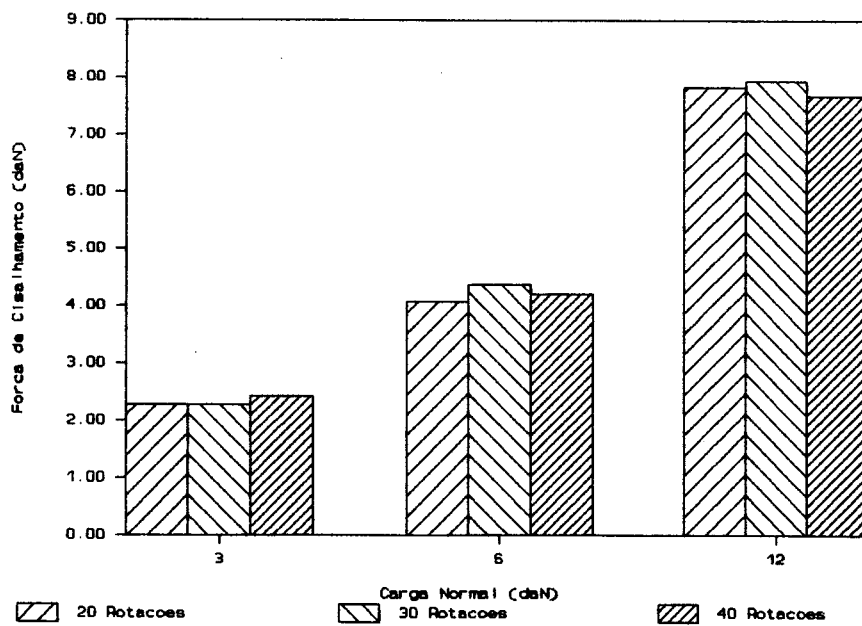


FIGURA 59. Força de cisalhamento média (F_s) dos testes de estado estável da colza.

Da Figura 59 (F_s) colza, observa-se que a força de cisalhamento média obtida com o número de 40 rotações apresentou valores um pouco superiores, com exceção do nível de carga 6 daN, em que apresentou valor inferior aos outros (20, 30). No geral, os resultados tiveram diferenças muito pequenas, constatando-se que a influência do número de rotações 20, 30 e 40 nos valores da força de cisalhamento média obtidos, foi mínima.

As Figuras 60, 61, 62 e 63, construídas a partir dos dados das Tabelas 14 (F_{s1}), 15 (F_{sm}), 16 (F_{s2}) e 17 (F_s) dos produtos farinha de trigo e colza, respectivamente, mostram os desvios padrões dos valores da força de cisalhamento média relativos a cada nível de carga normal em função do número de rotações empregados.

Nas Figuras 60 (F_{s1}), 61 (F_{sm}) e 62 (F_{s2}) - farinha de trigo observa-se que:

- os desvios padrões da força de cisalhamento média dos resultados obtidos de F_{sm} (médio), apresentou no geral, valores ligeiramente menores que os de F_{s1} (máximo) e F_{s2} (mínimo). Portanto, apresenta resultados com valores mais confiáveis;

- as forças de cisalhamento de F_{s1} (máximo), F_{sm} (médio) e F_{s2} (mínimo) determinados com o número de 30 rotações, apresentaram-se, no geral, com desvios padrões ligeiramente menores, levando-se a obtenção de resultados com valores mais confiáveis do que os outros (20 e 40).

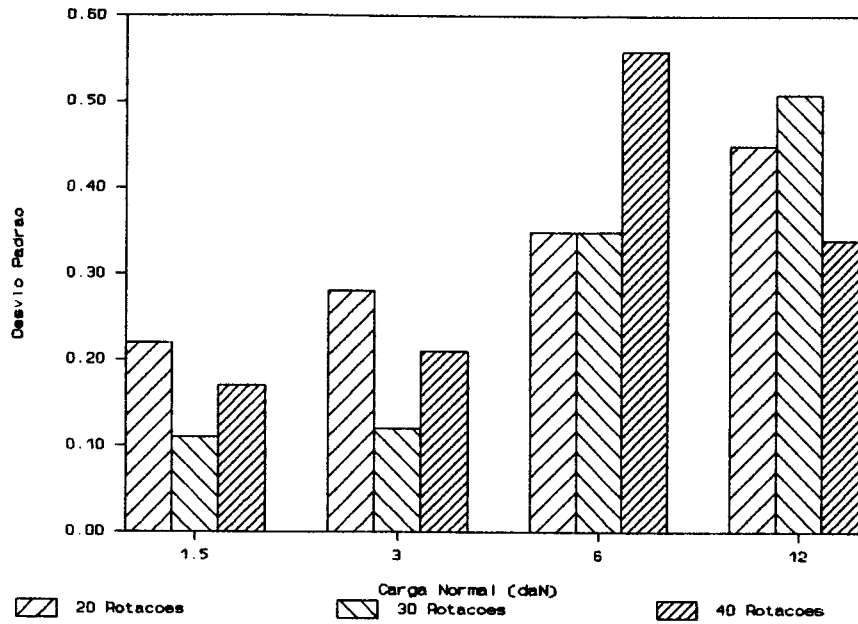


FIGURA 60. Desvios padrões da força de cisalhamento média (F_{s1}), dos testes de estado estável da farinha de trigo.

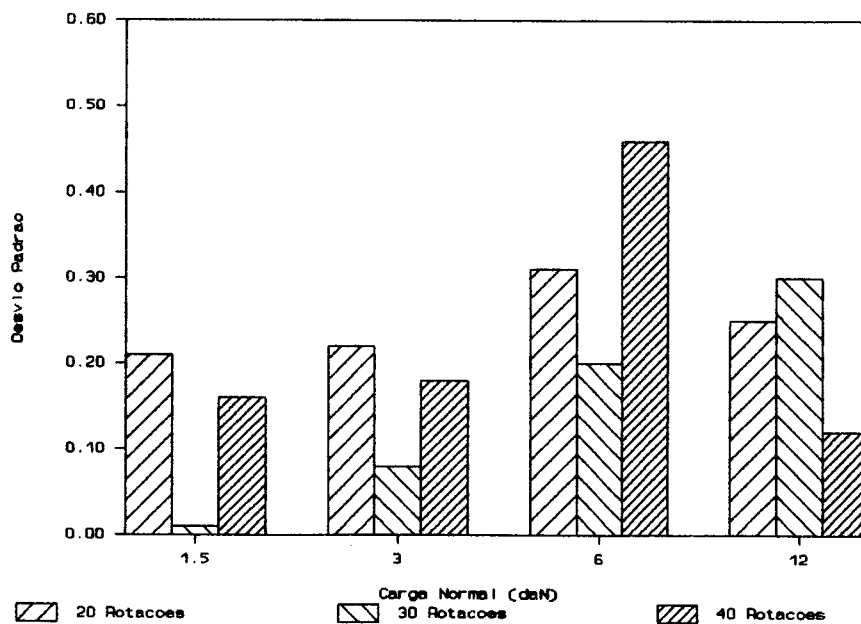


FIGURA 61. Desvios padrões da força de cisalhamento média (F_{s2}), dos testes de estado estável da farinha de trigo.

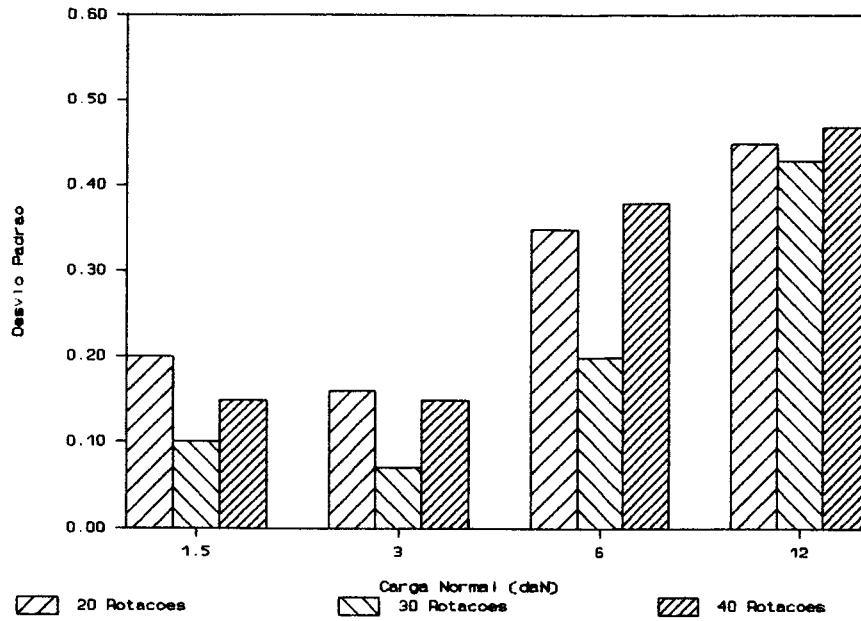


FIGURA 62. Desvios padrões da força de cisalhamento média (F_{s2}), dos testes de estado estável da farinha de trigo.

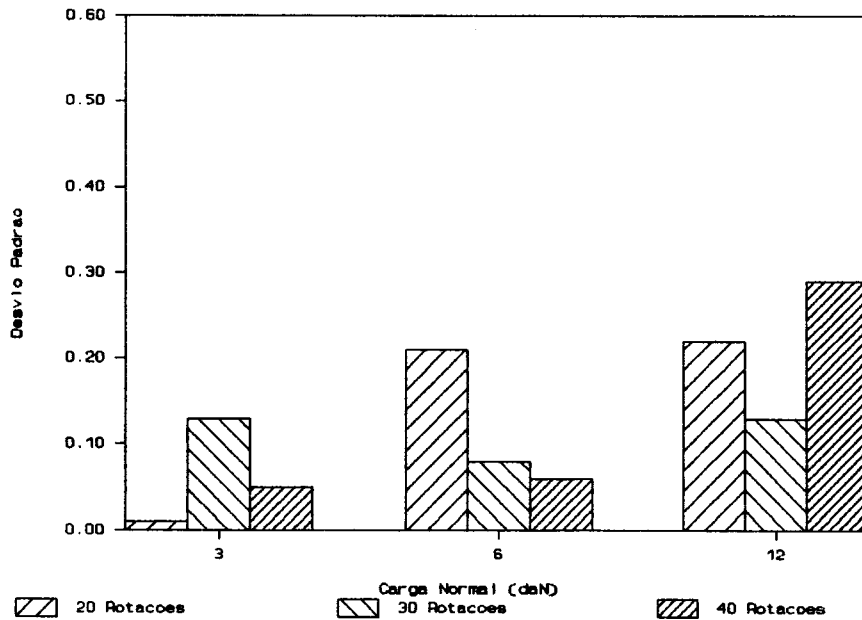


FIGURA 63. Desvios padrões da força de cisalhamento média (F_s), dos testes de estado estável da colza.

Para a Figura 63 (F_s) - colza observa-se que os valores da força de cisalhamento tiveram menores desvios padrões com o nível de carga normal 3 daN, sendo que o número de 20 rotações apresentou o menor deles. O nível de carga normal 12 daN apresentou os menores desvios padrões, com o número 30 rotações com menor valor entre eles.

A Tabela 14 apresenta um resumo dos valores das análises estatísticas realizadas com os resultados da força de cisalhamento obtidos nos testes de estado estável dos produtos farinha de trigo (F_{s1} , F_{s2} e F_{s3}) e colza (F_s).

TABELA 14. Resultado das análises estatísticas e dos valores da força de cisalhamento obtidos nos testes de estado estável da farinha de trigo e colza.

Estatística da Análise de Variância	Produtos			
	Farinha de Trigo			Colza
	F_{s1}	F_{s2}	F_{s3}	F_s
F (rotações)	0,95 NS	1,80 NS	1,13 NS	1,58 NS
F (carga normal)	1495,71 **	2698,69 **	1571,23 **	2792,44 **
F (interação: rotação x carga normal)	2,27 *	3,33 **	1,52 NS	1,92 NS
Média Geral (daN)	4,30	4,17	4,04	4,78
Desvio Padrão	0,33	0,23	0,29	0,15
Coeficiente de Variação	7,82	5,69	7,28	3,30

* - significativo a nível de 5% de probabilidade

** - significativo a nível de 1% de probabilidade

Dos valores apresentados na Tabela 14, com relação aos resultados da força de cisalhamento obtidos nos testes de estado estável, constata-se que:

- com relação ao número de rotações (20, 30 e 40) utilizados, os valores de F obtidos dos produtos farinha de trigo (F_{s1} - 0,95 NS; F_{sm} - 1,80 NS e F_{s2} - 1,13 NS) e da colza (F_s - 1,58 NS) foram não significativos;

- os valores de F obtidos dos produtos farinha de trigo (F_{s1} - 1495,71 **; F_{sm} 2698,69 ** e F_{s2} - 1571,23 **) e da colza (F_s - 1,58 NS), com relação aos níveis de cargas normais, foram significativos para os dois produtos e as diferenças nos níveis de cargas normais podem ser vistas nas Figuras 56 (F_{s1}), 57 (F_{sm}), 58 (F_{s2}) e 59 (F_s), onde nota-se o efeito da carga mais intenso para farinha de trigo;

- os valores de F obtidos da interação entre os números de rotações (20, 30 e 40) e os níveis de cargas normais, conforme os produtos foram os seguintes:

a) farinha de trigo

F_{s1} (2,27 *), diferiram significativamente;

F_{sm} (3,33 **), diferiram significativamente;

F_{s2} (1,52 NS), foi não significativo.

b) colza (F_s 1,92 NS), foi não significativo.

Os valores da média geral para a farinha de trigo foi 4,30 (F_{s1}), 4,17 (F_{sm}) e 4,04 daN (F_{s2}) e da colza 4,78 daN (F_s);

- Os valores dos desvios padrões médios dos resultados obtidos nos testes de estado estável da farinha de trigo foram: 0,33 (F_{s1}), 0,23 (F_{sm}) e 0,29 (F_{s2}) e da colza foi 0,15 (F_s). Nota-se valores pouco maiores para farinha de trigo,

um pouco menor para F_{sm} e bem menor para colza;

- Os valores dos coeficientes de variação obtidos para os testes de estado estável de cada produto foram os seguintes:

a) farinha de trigo: 7,82; 5,69 e 7,28 para F_{s1} (máximo), F_{sm} (médio) e F_{s2} (mínimo), respectivamente, indicando que os valores F_{sm} representaram resultados com menores variações.

b) colza: 3,30 (F_s)

Comparando os valores do coeficiente de variação, verifica-se que a farinha de trigo apresenta resultados com maiores variações do que a colza, em condições idênticas dos testes.

As Figuras 64 e 65, construídas a partir dos dados das Tabelas 15 e 16 dos produtos farinha de trigo e colza, respectivamente, apresentam os valores da densidade média relativa a cada nível de carga normal em função do número de rotações utilizados.

Na Figura 64 (farinha de trigo), observa-se que os valores das densidades médias obtidas com os números de 20, 30 e 40 rotações, com relação aos níveis de cargas normais, tiveram pouca variação, apresentando-se no geral, valores um pouco maiores para os resultados com o número de 40 rotações e menores para 30 rotações.

As Tabelas 15 e 16 apresentam os valores da densidade média e do desvio padrão dos resultados obtidos nos

testes de estado estável dos produtos farinha de trigo e colza, respectivamente.

TABELA 15. Valores da densidade média e do desvio padrão dos resultados obtidos nos testes de estado estável - farinha de trigo (6 repetições).

Número de Rotações	Carga Normal Pré-Shear (daN)	Densidade Média daN/m ³	Desvio Padrão
20	1,50	559,76	24,95
	3,00	586,87	12,75
	6,00	604,09	11,20
	12,00	613,81	6,86
30	1,50	575,78	18,86
	3,00	595,38	10,55
	6,00	600,59	17,20
	12,00	614,41	7,03
40	1,50	580,30	21,06
	3,00	590,53	14,25
	6,00	601,62	9,15
	12,00	619,95	10,03

TABELA 16. Valores da densidade média e do desvio padrão dos resultados obtidos nos testes de estado estável - colza (3 repetições).

Número de Rotações	Carga Normal Pré-Shear (daN)	Densidade Média daN/m ³	Desvio Padrão
20	3,00	467,34	0,29
	6,00	464,96	7,16
	12,00	480,64	6,86
30	3,00	465,81	6,98
	6,00	470,41	2,30
	12,00	479,45	11,05
40	3,00	464,79	4,73
	6,00	469,22	2,57
	12,00	459,67	9,30

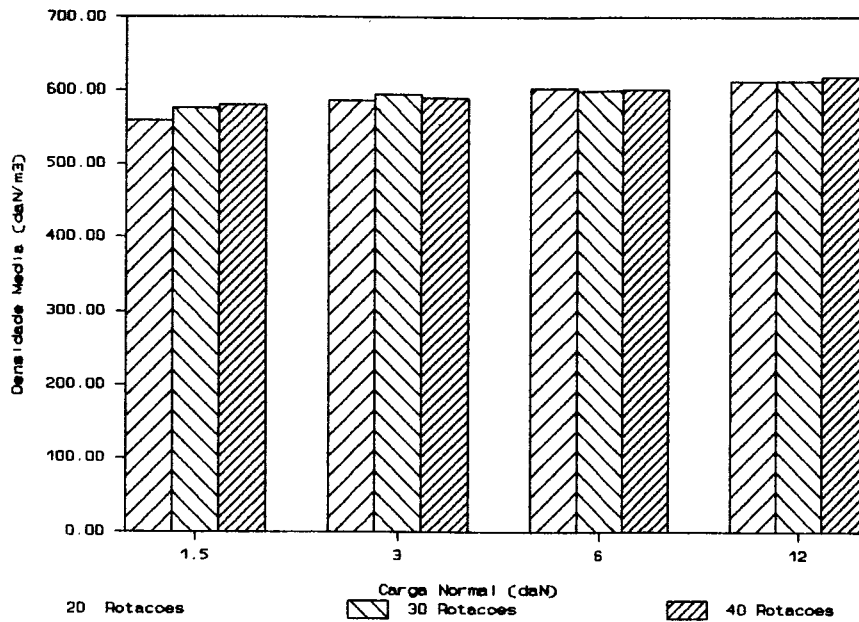


FIGURA 64. Valores da densidade média dos testes de estado estável da farinha de trigo.

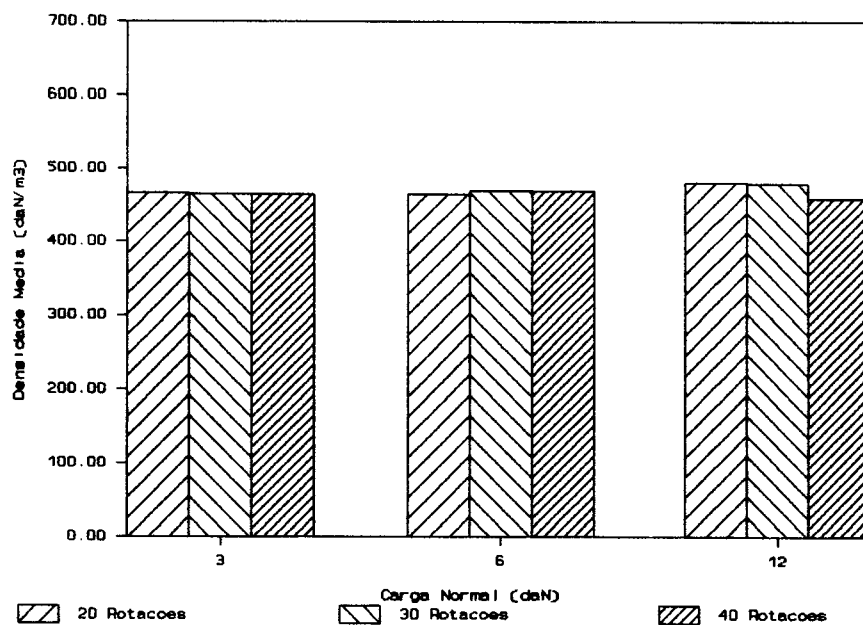


FIGURA 65. Valores da densidade média dos testes de estado estável da colza.

Para a Figura 65 (colza), observa-se que os valores obtidos da densidade média foram praticamente os mesmos com relação aos níveis de cargas normais e dos números de rotações 20, 30 e 40 utilizados, apresentando-se no geral, os de 40 rotações, resultados um pouco superiores aos demais (20 e 30).

As Figuras 66 e 67, construídas a partir dos dados das tabelas 15 e 16 dos produtos farinha de trigo e colza, respectivamente, apresentam os valores dos desvios padrões da densidade média relativa a cada nível de carga normal em função dos números de rotações utilizados.

Da Figura 66 (farinha de trigo), observa-se que os valores das densidades médias determinados com o número de 30 rotações apresentaram-se, no geral, menores desvios padrões, levando a obtenção de resultados com valores mais homogêneos que os demais números (20 e 40).

Na Figura 67 (colza) observa-se que os valores das densidades médias determinados com o número de 20 rotações tiveram, no geral, desvios padrões ligeiramente inferiores aos outros (30 e 40). Portanto, constata-se que os valores da densidade média obtidos com o número de 20 rotações são mais homogêneos.

A Tabela 17, apresenta um resumo dos valores das análises estatísticas realizadas com os resultados da densidade obtidos nos testes de estado estável dos produtos farinha de trigo e colza.

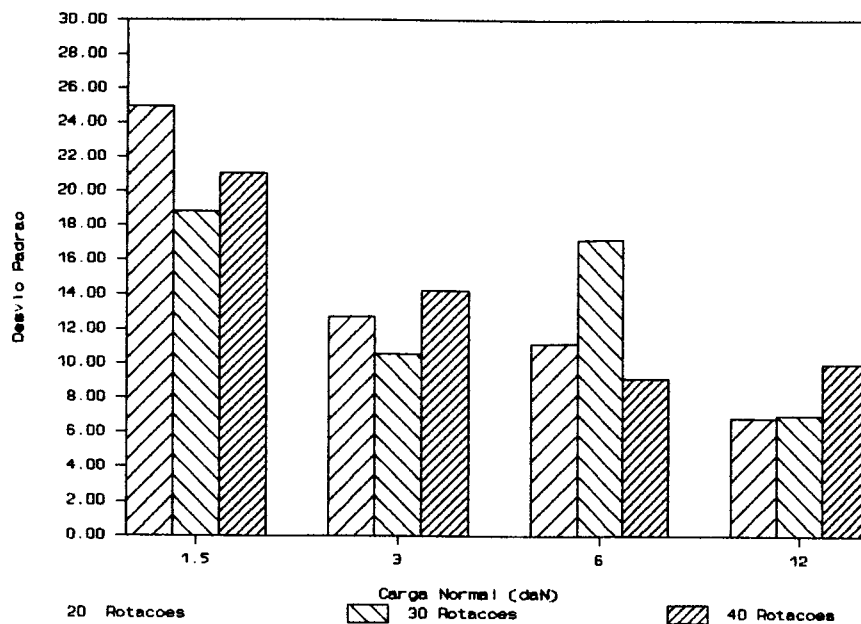


FIGURA 66. Desvios padrões da densidade média dos testes de estado estável da farinha de trigo.

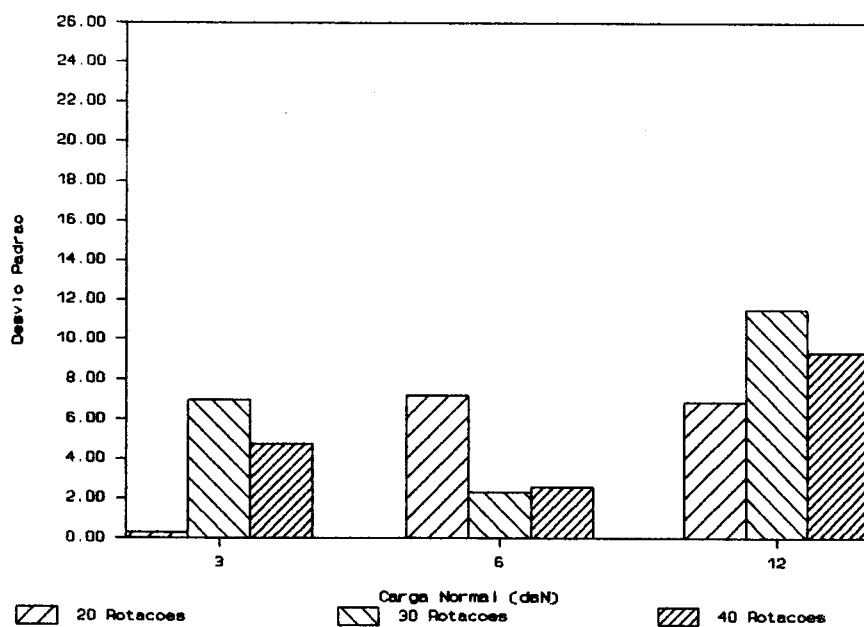


FIGURA 67. Valores dos desvios padrões da densidade média dos testes de estado estável da colza.

TABELA 17. Resultados das análises estatísticas dos valores das densidades obtidos nos testes de estado estável dos produtos farinha de trigo e colza.

Estatísticas da Análise de Variância	Produtos	
	Farinha de Trigo	Colza
F (rotações)	1,48 NS	3,23 NS
F (carga)	28,83 **	2,81 NS
F (interação: rotações x carga normal)	0,88 NS	3,39 *
Média Geral (daN/m ³)	595,26	469,14
Desvio Padrão	14,72	6,67
Coefficiente de Variação	2,47	1,42

* - significativo a nível de 5% de probabilidade

** - significativo a nível de 1% de probabilidade

Dos valores apresentados na Tabela 17 constata-se que:

- com relação ao número de rotações (20, 30 e 40) utilizados, os valores de F obtidos para os produtos farinha de trigo (1,48 NS) e colza (3,23 NS), foram não significativos (farinha de trigo Figura 64 e colza Figura 65);

- os valores de F obtidos com relação aos níveis de cargas normais dos produtos farinha de trigo (28,23 **), diferiram significativamente e as diferenças nos níveis de cargas normais podem ser notadas na Figura 64 e da colza (2,81 NS), foi não significativo (Figura 65);

- os valores de F obtidos na interação entre o

número de rotações (20, 30 e 40) e os níveis de cargas normais da farinha de trigo (0,88 NS) foi não significativo e da colza (3,39 *) diferiram significativamente;

- os valores da média geral dos produtos farinha de trigo e colza foram 595,26 e 464,14 daN/m³, respectivamente;

- os valores dos desvios padrões dos resultados obtidos nos testes de estado estável para os produtos farinha de trigo e colza foram 14,72 e 6,67, respectivamente;

Os valores do coeficiente de variação obtidos para os testes de estado estável para os produtos farinha de trigo e colza foram 2,47 e 1,42, respectivamente; indicando que os testes da farinha de trigo (pulverulento) apresentam valores com variações maiores do que a colza (indicações dos testes idênticos).

5.5. Teste de Cisalhamento Instantâneo

5.5.1. Pontos válidos do teste de cisalhamento instantâneo

Antes da construção dos lugares geométricos dos testes de cisalhamento instantâneo dos produtos farinha de trigo e colza, realizou-se uma análise dos pontos determinados no shear (Tabela 18) com relação a construção de uma linha reta (lugar geométrico). Para avaliação da reta utilizou-se o coeficiente de determinação (R^2).

TABELA 18. Valores médios das tensões normais e de cisalhamento e de seus desvios padrões, com relação aos níveis de cargas normais (shear e pré-shear) em função dos números de rotações dos testes de cisalhamento instantâneo dos produtos farinha de trigo e colza.

Número de Rotações	Carga Normal (daN)		Tensões kN/m ²				Desvio Padrão - Tensões			
	Pré-Shear	Shear	Normal (σ) Produto		Cisalhamento (τ) Produto		Normal (σ) Produto		Cisalhamento (τ) Produto	
			Farinha de Trigo	Colza	Farinha de Trigo	Colza	Farinha de Trigo	Colza	Farinha de Trigo	Colza
20	1,50	0,40	1,70	-	1,24	-	0,00	-	0,05	-
		0,60	1,99	-	1,58	-	0,00	-	0,13	-
		0,80	2,28	-	1,63	-	0,00	-	0,11	-
		1,00	2,57	-	1,93	-	0,00	-	0,13	-
	3,00	1,00	2,57	-	1,90	-	0,00	-	0,23	-
		1,50	3,30	3,28	2,44	2,03	0,00	0,00	0,16	0,03
		2,00	4,02	4,00	2,89	2,44	0,00	0,00	0,19	0,03
		2,50	4,74	6,17	3,34	2,79	0,00	0,00	0,14	0,01
	6,00	1,50	3,30	-	2,53	-	0,00	-	0,25	-
		2,50	4,74	4,72	3,63	3,01	0,00	0,00	0,38	0,03
		3,50	6,19	5,73	4,50	3,97	0,00	0,00	0,31	0,02
		4,50	7,63	7,61	5,39	4,81	0,00	0,00	0,18	0,10
12,00	3,00	5,47	-	4,63	-	0,00	-	0,31	-	
	5,00	8,36	8,34	6,54	5,36	0,00	0,00	0,19	0,13	
	7,00	11,25	11,23	8,45	7,60	0,00	0,00	0,28	0,43	
	9,00	14,13	14,12	10,23	9,04	0,00	0,00	0,70	0,34	
30	1,50	0,40	1,70	-	1,36	-	0,00	-	0,08	-
		0,60	1,99	-	1,50	-	0,00	-	0,12	-
		0,80	2,28	-	1,66	-	0,00	-	0,07	-
		1,00	2,57	-	1,76	-	0,00	-	0,09	-
	3,00	1,00	2,57	-	1,95	-	0,00	-	0,23	-
		1,50	3,30	3,28	2,65	2,00	0,00	0,00	0,16	0,03
		2,00	4,02	4,00	3,02	2,39	0,00	0,00	0,12	0,01
		2,50	4,74	6,17	3,23	2,87	0,00	0,00	0,12	0,02
	6,00	1,50	3,30	-	2,70	-	0,00	-	0,04	-
		2,50	4,74	4,72	3,84	3,07	0,00	0,00	0,22	0,04
		3,50	6,19	5,73	4,82	4,01	0,00	0,00	0,23	0,10
		4,50	7,63	7,61	5,55	4,95	0,00	0,00	0,26	0,14
12,00	3,00	5,47	-	4,32	-	0,00	-	0,15	-	
	5,00	8,36	8,34	6,52	5,41	0,00	0,00	0,57	0,11	
	7,00	11,25	11,23	8,13	7,31	0,00	0,00	0,26	0,15	
	9,00	14,13	14,12	9,92	9,03	0,00	0,00	0,23	0,21	

continua ...

Número de Rotações	Carga Normal (daN)		Tensões kN/m ²				Desvio Padrão - Tensões			
			Normal (σ)		Cisalhamento (τ)		Normal (σ)		Cisalhamento (τ)	
			Produto		Produto		Produto		Produto	
	Pré-Shear	Shear	Farinha de Trigo	Colza	Farinha de Trigo	Colza	Farinha de Trigo	Colza	Farinha de Trigo	Colza
continuação da Tabela 18.										
40	1,50	0,40	1,70	-	1,34	-	0,00	-	0,05	-
		0,60	1,99	-	1,44	-	0,00	-	0,13	-
		0,80	2,28	-	1,70	-	0,00	-	0,10	-
		1,00	2,57	-	1,91	-	0,00	-	0,12	-
	3,00	1,00	2,57	-	1,92	-	0,00	-	0,13	-
		1,50	3,30	3,28	2,37	2,01	0,00	0,00	0,19	0,04
		2,00	4,02	4,00	2,92	2,44	0,00	0,00	0,24	0,03
		2,50	4,74	6,17	3,18	2,84	0,00	0,00	0,48	0,03
	6,00	1,50	3,30	-	2,70	-	0,00	-	0,23	-
		2,50	4,74	4,72	3,71	3,09	0,00	0,00	0,13	0,02
		3,50	6,19	5,73	4,59	4,12	0,00	0,00	0,10	0,02
		4,50	7,63	7,61	5,37	5,07	0,00	0,00	0,39	0,11
	12,00	3,00	5,47	-	4,09	-	0,00	-	0,22	-
		5,00	8,36	8,34	6,09	5,85	0,00	0,00	0,41	0,20
		7,00	11,25	11,23	8,25	7,73	0,00	0,00	0,42	0,13
		9,00	14,13	14,12	9,57	9,54	0,00	0,00	0,39	0,14

a) Farinha de trigo

Os testes de cisalhamento instantâneo para farinha de trigo foram realizados com 4 níveis de cargas normais de shear para cada pré-shear, determinando-se 4 pontos para construção da reta. Destes realizou-se o ajuste de retas construídas com 3 (maiores) e 4 pontos e são apresentados nas Tabelas 19 e 20 os seus valores médios de R^2 (6 repetições) e dos desvios padrões com relação aos níveis de cargas normais de pré-shear em função dos números de rotações utilizados, respectivamente.

As Figuras 68, 69 (3 pontos), 70 e 71 (4 pontos)

construídas a partir dos dados das Tabelas 18 (3 pontos) e 19 (4 pontos), respectivamente, apresentam os valores médios de R^2 e do desvio padrão médio com relação aos níveis de cargas normais de shear, em função do número de rotações (20, 30 e 40) utilizados.

Das Figuras 68, 69, 70 e 71 observa-se que a reta construída com 4 pontos obteve, no geral, os maiores valores de R^2 , com menores desvios padrões. Portanto, a utilização de 4 pontos para construção da reta ajusta-se melhor do que com 3. Assim sendo, os lugares geométricos dos testes de cisalhamento instantâneo da farinha de trigo foram construídos com 4 pontos.

TABELA 19. Valores médios de R^2 e do desvio padrão, obtidos do ajuste da reta com 3 pontos (farinha de trigo).

Número de Rotações	Carga Normal Pré-Shear (daN)	R^2 3 Pontos	Desvio Padrão
20	1,5	0,76	0,27
	3,0	0,89	0,16
	6,0	0,89	0,12
	12,0	0,98	0,02
30	1,5	0,65	0,36
	3,0	0,85	0,20
	6,0	0,96	0,03
	12,0	0,96	0,03
40	1,5	0,85	0,26
	3,0	0,74	0,31
	6,0	0,84	0,38
	12,0	0,94	0,04

TABELA 20. Valores médios de R^2 e do desvio padrão do ajuste da reta com 4 pontos (farinha de trigo).

Número de Rotações	Carga Normal Pré-Shear (daN)	R^2 4 Pontos	Desvio Padrão
20	1,5	0,88	0,11
	3,0	0,93	0,07
	6,0	0,93	0,06
	12,0	0,82	0,35
30	1,5	0,68	0,17
	3,0	0,89	0,09
	6,0	0,97	0,02
	12,0	0,98	0,02
40	1,5	0,81	0,25
	3,0	0,89	0,13
	6,0	0,97	0,05
	12,0	0,98	0,02

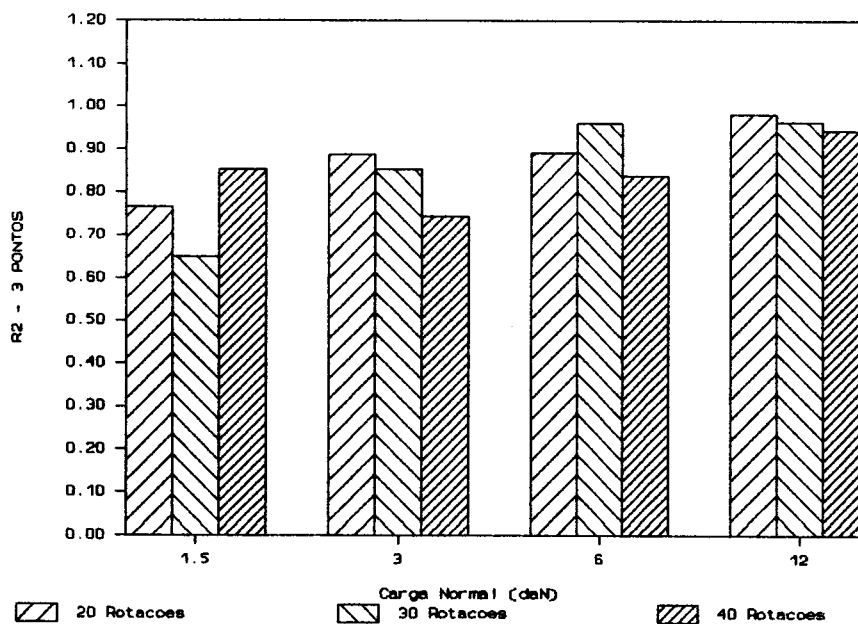


FIGURA 68. Valores médios de R^2 , obtidos do ajuste da reta com 3 pontos (farinha de trigo).

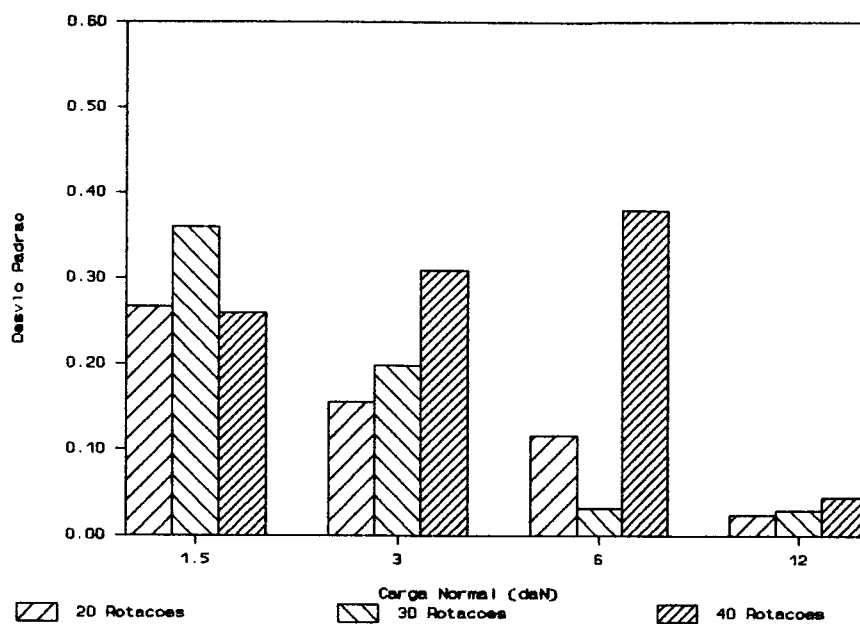


FIGURA 69. Valores médios do desvio padrão, obtidos do ajuste da reta com 4 pontos (farinha de trigo)

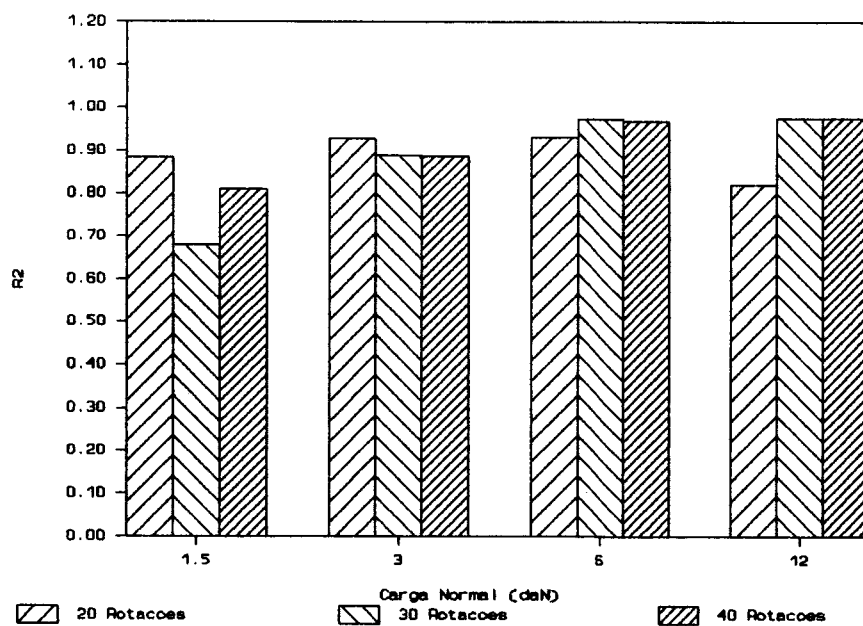


FIGURA 70. Valores médios de R^2 , obtidos do ajuste da reta com 4 pontos (farinha de trigo)

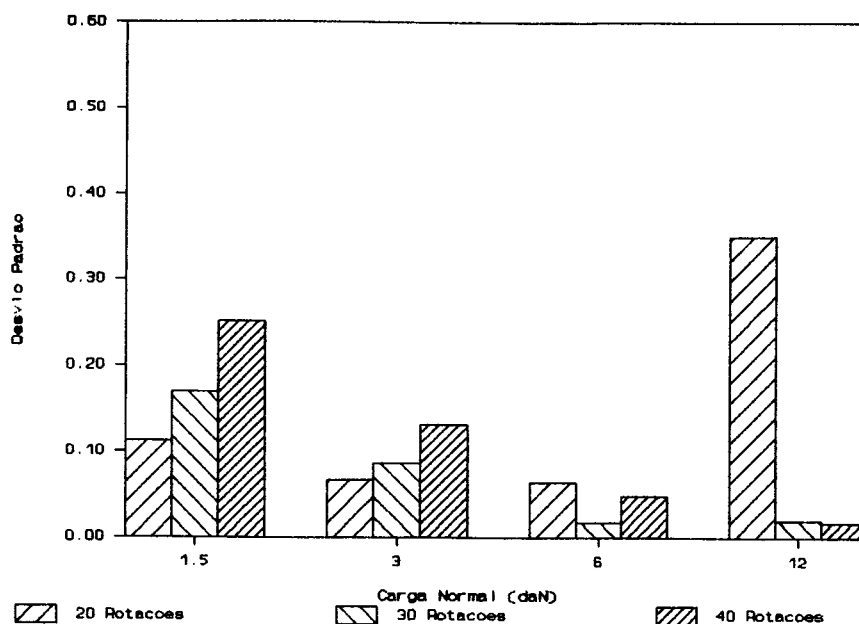


FIGURA 71. Valores médios dos desvios padrões, obtidos do ajuste da reta com 4 pontos (farinha de trigo)

b) Colza

Realizou-se os testes de cisalhamento instantâneo da colza com 3 níveis de cargas normais de shear, determinando-se 3 pontos para a construção da reta (lugar geométrico). Com eles, realizou-se o ajuste da reta e os valores médios de R^2 e de seus desvios padrões médios são apresentados na Tabela 21.

A Figura 72, construída a partir dos dados da Tabela 21, apresenta os valores médios de R^2 , com relação aos níveis de cargas normais de pré-shear em função do número de rotações (20, 30 e 40) utilizados. Destes valores obtidos, constata-se que a reta construída com 3 pontos teve um bom ajuste para qualquer nível de carga normal de pré-shear. Portanto, utilizou-se 3 pontos para a construção dos lugares geométricos dos testes de cisalhamento instantâneo da colza.

TABELA 21. Valores médios de R^2 e do desvio padrão obtidos do ajuste da reta com 3 pontos (colza).

Número de Rotações	Carga Normal Pré-Shear (daN)	R^2 3 Pontos	Desvio Padrão
20	3,0	0,99	0,00
	6,0	0,99	0,00
	12,0	0,99	0,00
30	3,0	0,99	0,00
	6,0	0,99	0,00
	12,0	0,99	0,00
40	3,0	0,99	0,00
	6,0	0,99	0,00
	12,0	0,99	0,00

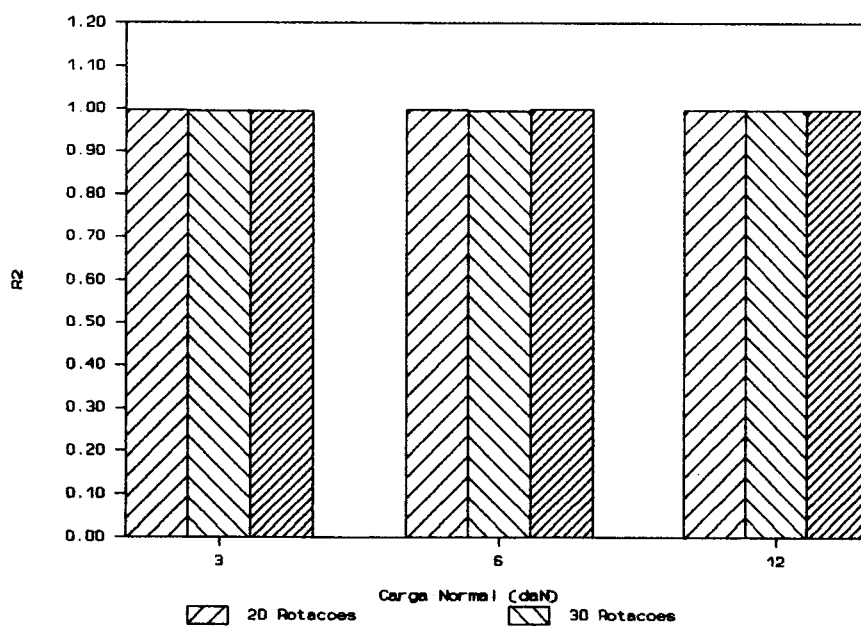


FIGURA 72. Valores médios de R^2 , obtidos do ajuste da reta com 3 pontos (colza).

5.5.2. Ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito dos testes de cisalhamento dos produtos farinha de trigo e colza

Os valores médios do ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito e seus desvios padrões, obtidos dos testes de cisalhamento dos produtos farinha de trigo e colza, são apresentados nas Tabelas 22 e 23, respectivamente.

TABELA 22. Valores médios do ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito e de seus desvios padrões dos testes de cisalhamento instantâneo-farinha de trigo.

Número de Rotações	Carga Normal de Pré-Shear (daN)	Âng. Atrito (graus)		Desvio Padrão	
		Interno	Efetivo	Interno	Efetivo
20	1,50	35,88	36,25	4,86	1,61
	3,00	33,32	34,90	6,17	1,03
	6,00	33,45	35,67	3,72	1,57
	12,00	33,21	35,98	2,73	1,50
30	1,50	31,66	35,30	2,26	0,59
	3,00	30,08	35,36	3,87	1,07
	6,00	33,41	36,90	2,42	0,99
	12,00	32,75	35,69	0,99	0,34
40	1,50	31,45	35,66	12,18	1,65
	3,00	32,93	35,99	6,93	0,72
	6,00	31,48	35,62	4,56	1,80
	12,00	32,65	34,78	2,76	1,04

TABELA 23. Valores médios do ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito e de seus desvios padrões dos testes de cisalhamento instantâneo - colza.

Número de Rotações	Carga Normal de Pré-Shear (daN)	Âng. Atrito (graus)		Desvio Padrão	
		Interno	Efetivo	Interno	Efetivo
20	3,00	30,65	30,65	0,04	0,01
	6,00	32,25	32,36	0,61	0,40
	12,00	33,01	33,01	0,48	0,23
30	3,00	31,19	31,19	0,13	0,02
	6,00	32,98	33,98	0,53	0,27
	12,00	32,64	32,64	0,61	0,36
40	3,00	31,11	31,11	0,13	0,02
	6,00	33,72	33,72	0,46	0,21
	12,00	33,89	33,89	0,66	0,43

5.5.2.1. Ângulo de atrito interno

As Figuras 73, 74 (farinha de trigo), 75 e 76 (colza), construídas a partir dos dados das Tabelas 22 (farinha de trigo) e 23 (colza), apresentam valores médios do ângulo de atrito interno (73 e 75) e de seus desvios padrões (74 e 76), com relação aos níveis de cargas normais (pré-shear) em função dos números de rotações utilizados, dos testes de cisalhamento instantâneo dos produtos farinha de trigo e colza.

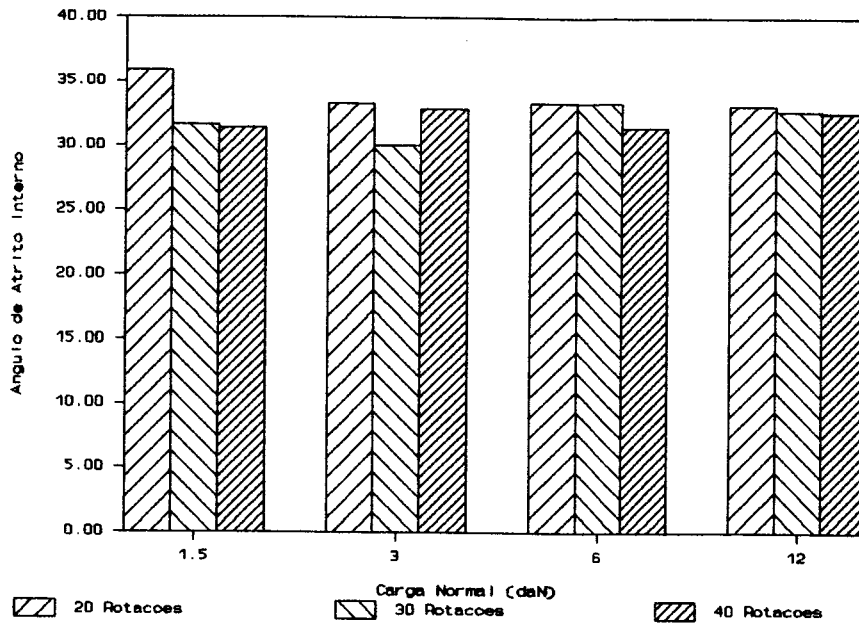


FIGURA 73. Valores médios do ângulo de atrito interno dos testes de cisalhamento instantâneo (farinha de trigo).

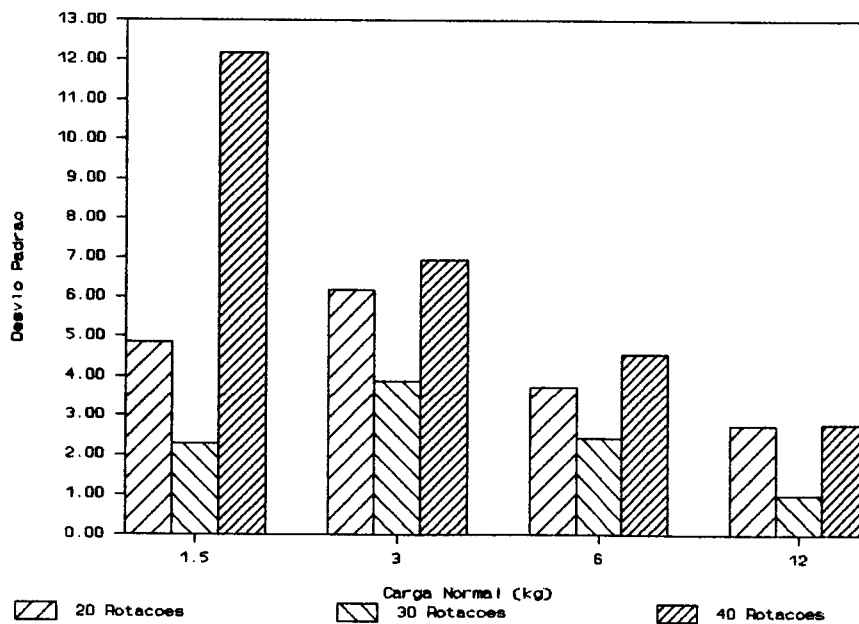


FIGURA 74. Valores médios dos desvios padrões dos ângulos de atrito interno, dos testes de cisalhamento instantâneo (farinha de trigo).

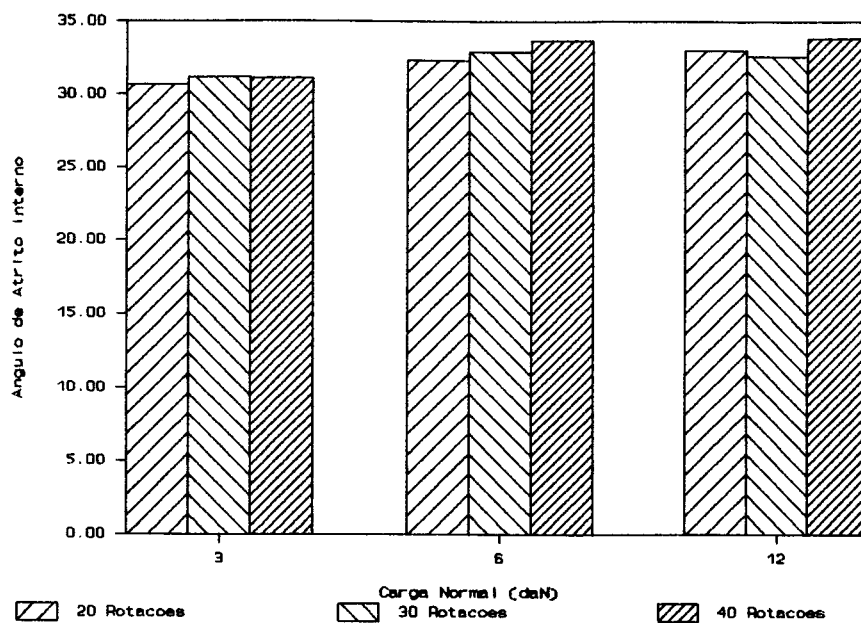


FIGURA 75. Valores médios do ângulo de atrito interno, dos testes de cisalhamento instantâneo (colza)

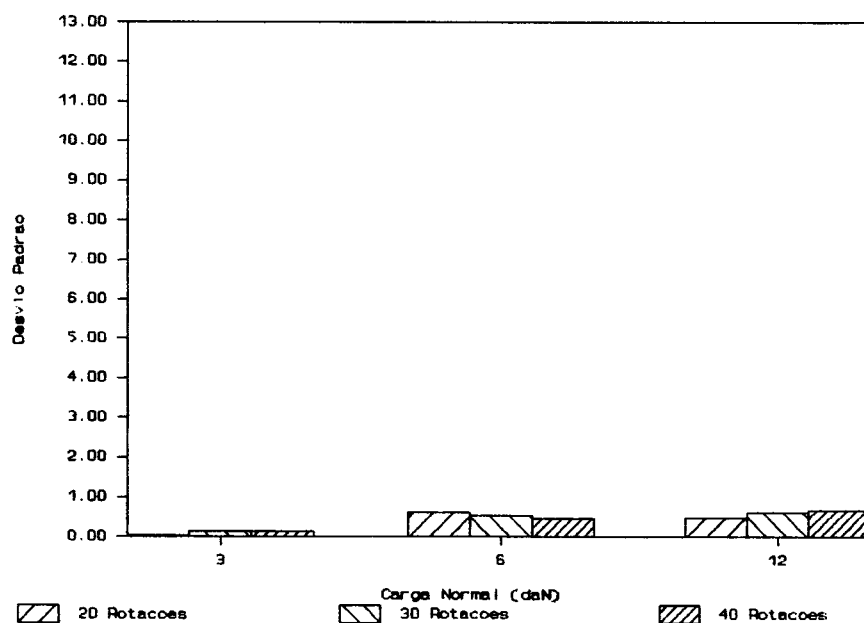


FIGURA 76. Valores médios dos desvios padrões do ângulo de atrito interno, dos testes de cisalhamento instantâneo (colza).

Para os valores da Figuras 73 e 74 (farinha de trigo), verifica-se que:

- os valores médios do ângulo de atrito interno, com relação aos níveis de cargas normais (pré-shear), foram maiores quando se utilizou 20 rotações e menores para 30;

- o nível de carga normal (pré-shear) de 12,0 daN foi o que apresentou a menor variação entre os valores médios do ângulo de atrito interno em função do número de rotações (20, 30 e 40) utilizados;

- o número de 30 rotações foi o que apresentou menores desvios padrões dos valores médios do ângulo de atrito interno, com o máximo e mínimo para cargas normais (pré-shear) 12, 0 e 3,0 daN, respectivamente.

Os maiores valores ocorreram com número de 40 rotações, apresentando os desvios máximo e mínimo com as cargas normais (pré-shear) 1,5 e 12,0 daN. Portanto, os valores médios do ângulo de atrito interno determinados com 30 rotações são mais homogêneos.

Os valores das Figuras 75 e 76 (colza) mostram que:

- os valores médios do ângulo de atrito interno tiveram valores mínimos e máximos para os níveis de cargas normais (pré-shear) 3,0 e 12,0 daN, com menores variações entre eles, em função dos números de rotações 20, 30 e 40, para o nível de 3, 0 daN;

- o número de 40 e 20 rotações apresentaram, no

geral, os valores máximos e mínimos do ângulo de atrito interno, respectivamente, com relação aos níveis de cargas normais;

- o número de 20 rotações, no geral, apresentou menores desvios padrões dos valores médios do ângulo de atrito interno, indicando que os seus resultados obtidos são mais homogêneos.

A Tabela 24 apresenta um resumo dos resultados das análises estatísticas realizadas com os valores do ângulo de atrito interno, obtidos nos testes de cisalhamento instantâneo dos produtos farinha de trigo (6 repetições) e colza (3 repetições).

TABELA 24. Resultados das análises estatísticas dos valores do ângulo de atrito interno, obtidos nos testes de cisalhamento instantâneo (farinha de trigo e colza).

Estatísticas da Análise de Variância	Produtos	
	Farinha de Trigo	Colza
F (rotações)	1,05 NS	9,04**
F (carga normal de pré-shear)	0,99 NS	62,70**
f (interação: rotação x carga normal de pré-shear)	0,42NS	2,24NS
Média Geral (graus)	32,68	32,39
Desvio Padrão	5,28	0,46
Coefficiente de Variação	16,17	1,43

* - significativo a nível de 5% de probabilidade

** - significativo a nível de 1% de probabilidade

Dos resultados da Tabela 24 constata-se que:

- com relação aos números de rotações (20, 30 e

40) utilizados, os valores de F obtidos para farinha de trigo (1,05 NS) não foi significativo e para a colza (9,04^{tt}) foram significativos e as diferenças nos números de rotações podem ser notadas na Figura 75;

- dos valores de F obtidos, com relação aos níveis de cargas normais (pré-shear), o da farinha de trigo (0,99 NS) não foi significativo e o da colza (62,70^{tt}) foram significativos e as diferenças nos níveis de cargas normais podem ser notadas na Figura 75;

- da interação: carga normal (pré-shear) x rotações, os valores de F obtidos para a farinha de trigo e colza não foram significativos;

- a farinha de trigo e a colza apresentaram na média geral dos testes de cisalhamento instantâneo, os valores do ângulo de atrito interno 32,68 e 32,39, respectivamente;

- os valores médios dos desvios padrões foram 5,28 e 0,46 para a farinha de trigo e colza, respectivamente;

- os valores dos coeficientes de variação obtidos para os testes de cisalhamento instantâneo, com relação a determinação do ângulo de atrito interno, para os produtos farinha de trigo e colza foram 16,17 e 1,43, respectivamente, indicando que os resultados da farinha de trigo apresentam maiores variações do que os da colza (indicações de testes idênticos).

Dos resultados do ângulo de atrito interno que tiveram, no geral, menores desvios padrões, com relação aos

números de rotações utilizados, obteve-se para a farinha de trigo (30 rotações) um valor da média geral do ângulo de atrito interno 31,97 e do desvio padrão 2,38 e para a colza (20 rotações) 31,97 e 0,37, respectivamente.

Com a utilização da fórmula para erro da estimativa média:

$$erro=2\frac{S}{\sqrt{r}}$$

onde:

S = desvio padrão médio

r = número de repetições

determinou-se os valores dos erros 0,97 (3,03%) e 0,21 (0,65%) para a média geral do ângulo de atrito interno da farinha de trigo e colza, respectivamente; indicando que existe uma confiança de 95% que os ângulos de atritos médios verdadeiros estejam dentro dos intervalos de $31,97 \pm 0,97$ para a farinha de trigo e $31,97 \pm 0,21$ para a colza.

5.5.2.2. Efetivo ângulo de atrito

As Figuras 77 e 78 (farinha de trigo, 79 e 80 (colza), construídas a partir dos dados das Tabelas 22 (farinha de trigo) e 23 (colza), apresentam os valores médios do efetivo ângulo de atrito (77 e 79) e de seus desvios padrões (78 e 80), com relação aos níveis de cargas normais (pré-shear) em função dos números de rotações utilizados, dos testes de cisalhamento

instantâneo dos produtos farinha de trigo e colza.

Dos valores das Figuras 77 e 78 (farinha de trigo), verifica-se que: os resultados obtidos do efetivo ângulo de atrito tiveram pequenas variações entre si, com relação aos níveis de cargas normais em função do número de rotações utilizados; os determinados com o número de 30 rotações apresentaram, no geral, menores desvios padrões, correspondendo a valores mais homogêneos que os outros (20 e 30).

Para os valores das Figuras 79 e 80 (colza), observa-se que:

- os valores médios do efetivo ângulo de atrito foram maiores para o nível de carga normal (pré-shear) 12,0 daN e menores para 3,0 daN;

- o nível de carga normal (pré-shear) 3,0 daN foi o que apresentou menor variação dos valores médios do efetivo ângulo de atrito, em função dos números de rotações (20, 30 e 40) utilizados;

- com relação aos valores médios do desvio padrão do efetivo ângulo de atrito, o nível de carga normal (pré-shear) 3,0 daN apresentou os menores valores e o de 12,0 daN os maiores;

- os números de 20 e 40 rotações apresentaram os menores e maiores valores médios do desvio padrão do efetivo ângulo de atrito, respectivamente, para os níveis de cargas normais (pré-shear), com exceção do nível 6,0 daN que ocorreu uma inversão dos valores.

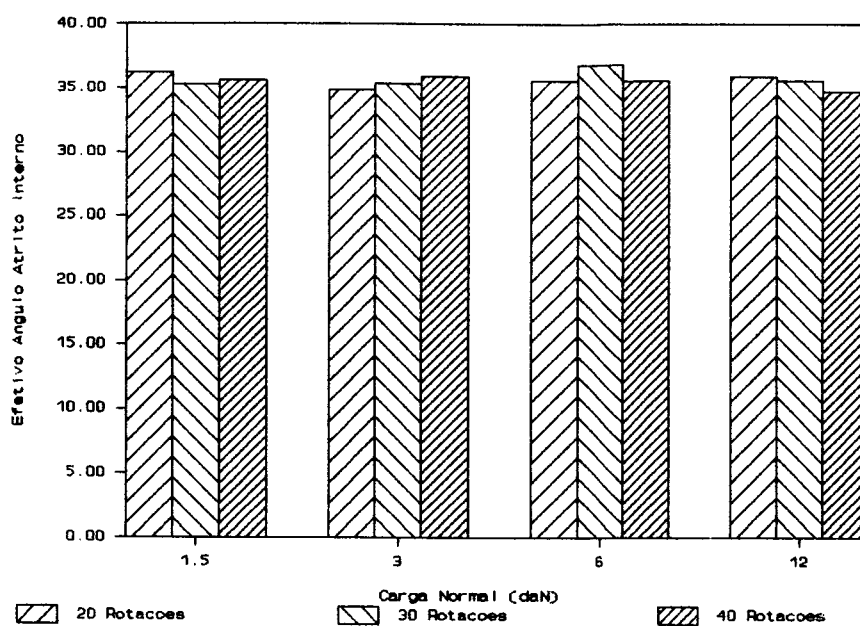


FIGURA 77. Valores médios do efetivo ângulo de atrito, dos testes de cisalhamento instantâneo (farinha de trigo).

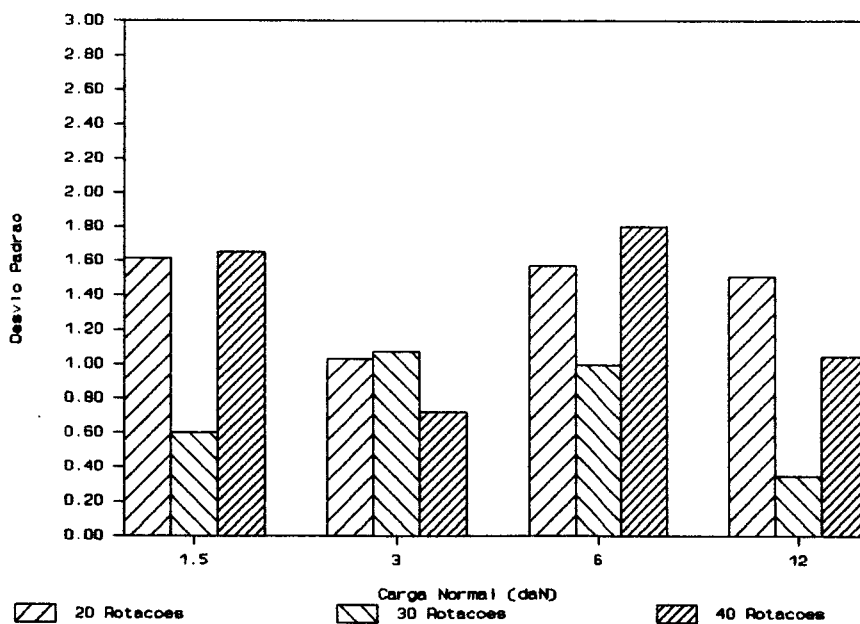


FIGURA 78. Valores médios dos desvios padrões do efetivo ângulo de atrito, dos testes de cisalhamento instantâneo (farinha de trigo).

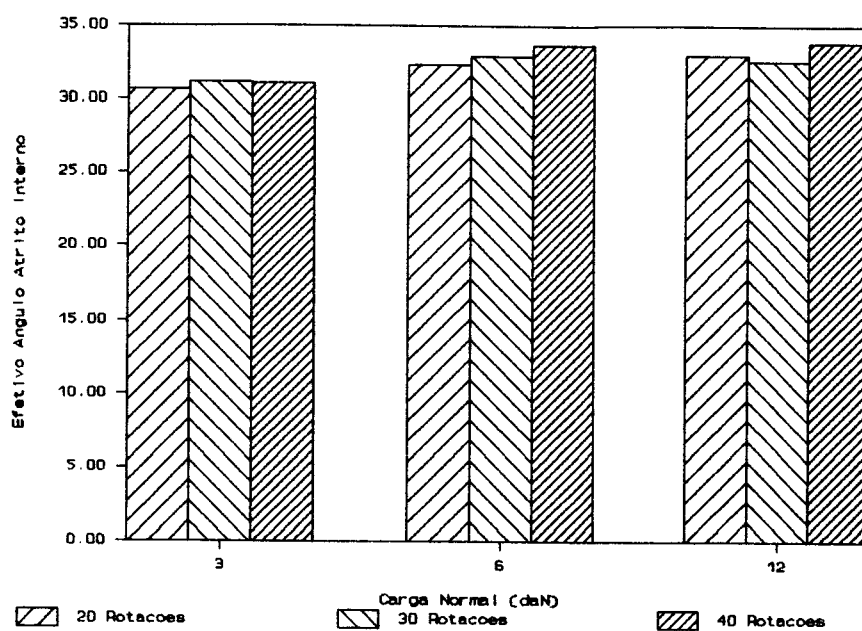


FIGURA 79. Valores médios do efetivo ângulo de atrito, dos testes de cisalhamento instantâneo (colza)

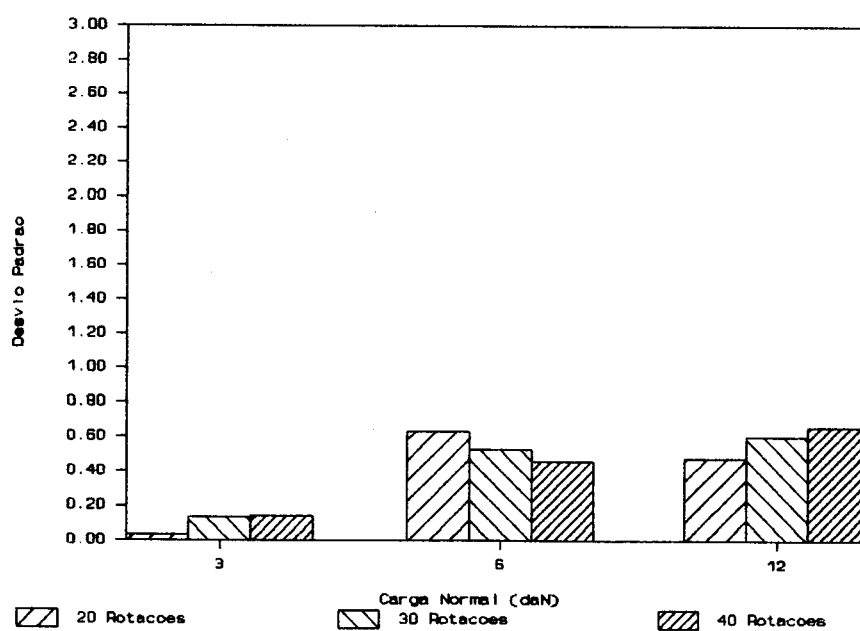


FIGURA 80. Valores médios do desvio padrão do efetivo ângulo de atrito dos testes de cisalhamento instantâneo (colza).

São apresentados na Tabela 25 um resumo dos resultados das análises estatísticas realizadas com os valores do efetivo ângulo de atrito, obtidos nos testes de cisalhamento instantâneos dos produtos farinha de trigo (6 repetições) e colza (3 repetições).

Para os resultados apresentados na Tabela 25 verifica-se que:

- com relação ao número de rotações (20, 30 e 40) utilizados, os valores de F obtidos para a farinha de trigo (0,35 NS) não foi significativo e para a colza foram significativos e as diferenças nos números de rotações podem ser notadas na Figura 79.

TABELA 25. Resultados das análises estatísticas dos valores do efetivo ângulo de atrito, obtidos nos testes de cisalhamento instantâneo dos produtos farinha de trigo e colza.

Estatísticas da Análise de Variância	Produtos	
	Farinha de Trigo	Colza
F (rotações)	0,35 NS	8,82**
F (carga normal de pré-shear)	0,99 NS	62,10**
f (interação: rotação x carga normal de pré-shear)	1,74 NS	2,18 NS
Média Geral (graus)	35,67	32,39
Desvio Padrão	1,24	0,46
Coefficiente de Variação	3,49	1,44

* - significativo a nível de 5% de probabilidade

** - significativo a nível de 1% de probabilidade

- dos valores de F obtidos, com relação aos

níveis de cargas normais (pré-shear) empregados, o da farinha de trigo (0,99 NS) não foi significativo e para a colza (62,10^{**}) foram significativos e as diferenças nos níveis de cargas normais podem ser vistas na Figura 79;

- da interação: carga normal (pré-shear) x rotações, os valores de F obtidos para a farinha de trigo e colza não foram significativos;

- Os valores da média geral do efetivo ângulo de atrito dos produtos farinha de trigo e colza foram 35,67 e 32,39, respectivamente;

- os valores médios dos desvios padrões do efetivo ângulo de atrito foram 1,24 e 0,46 para a farinha de trigo e colza, respectivamente;

- os valores dos coeficientes de variação obtidos para os testes de cisalhamento instantâneo, com relação a determinação do efetivo ângulo de atrito para os produtos farinha de trigo e colza, foram 3,49 e 1,44, respectivamente, indicando que os testes com a Farinha de trigo obtiveram resultados com maiores variações do que a colza (indicações de testes idênticos).

Considerando-se apenas os resultados do efetivo ângulo de atrito interno que tiveram, no geral, menores desvios padrões, com relação aos números de rotações utilizados, a farinha de trigo (30 rotações) apresentou um valor para a média geral 35,81 e do desvio padrão 0,74 e a colza (20 rotações) 32,12 e 0,21, respectivamente.

Com auxílio da fórmula para o erro da estimativa média:

$$erro = 2 \frac{S}{\sqrt{r}}$$

onde:

S = desvio padrão médio

r = número de repetições

obteve-se os valores dos erros 0,30 (0,84%) e 0,12 (0,37%) para a média geral do efetivo ângulo de atrito interno. Portanto, constata-se que existe uma confiança de 95% que os efetivos ângulos médios verdadeiros estejam dentro dos intervalos de $35,81 \pm 0,30$ para farinha de trigo e $32,12 \pm 0,12$ para a colza.

5.5.3. Tensão principal máxima

A Tabela 26 apresenta os valores médios da tensão principal máxima, obtidos nos testes de cisalhamento instantâneo dos produtos farinha de trigo e colza.

A partir dos dados da Tabela 26 foram construídas as Figuras 81, 82 (farinha de trigo), 83 e 84 (colza), que apresentam os valores da tensão principal máxima, com relação aos níveis de cargas normais (pré-shear) em função do número de rotações utilizados, obtidos dos testes de cisalhamento instantâneo dos produtos farinha de trigo e colza.

TABELA 26. Valores médios da tensão principal máxima e de seus desvios padrões dos testes de cisalhamento instantâneo dos produtos farinha de trigo e colza.

Número de Rotações	Carga Normal de Pré-Shear (daN)	Tensão Principal Máxima (kN/m ²)		Desvio Padrão	
		Produtos		Produtos	
		Farinha de Trigo	Colza	Farinha de Trigo	Colza
20	1,50	6,11	-	0,53	-
	3,00	10,95	10,33	0,74	0,61
	6,00	17,01	16,88	0,83	0,17
	12,00	30,81	33,37	0,64	1,63
30	1,50	6,56	-	0,19	-
	3,00	10,13	9,61	0,57	0,05
	6,00	16,37	17,07	0,36	0,29
	12,00	28,96	33,73	0,43	0,93
40	1,50	6,46	-	0,23	-
	3,00	10,28	9,48	0,27	0,08
	6,00	16,37	17,50	1,31	0,41
	12,00	29,66	32,24	0,76	2,09

Dos valores das Figuras 81 e 83 (farinha de trigo) observa-se que:

- a tensão principal máxima aumentou com a carga, tendo os valores máximos para 12,0 daN e mínimos para 1,5 daN;

- os valores médios da tensão principal máxima determinados com o número de 30 rotações, no geral, foram menores e os com 20 rotações, os maiores com relação aos níveis de cargas normais (pré-shear) utilizados;

- no geral, os valores médios da tensão principal máxima determinados com 30 rotações tiveram menores desvios padrões, correspondendo a resultados com valores mais homogêneos, para os níveis de cargas normais utilizados.

Nas Figuras 83 e 84 (colza) observa-se que:

- os valores médios da tensão principal máxima aumentaram com a carga normal com valores mínimos e máximos para os níveis de cargas normais (pré-shear) 3,0 e 12,0 daN, respectivamente;

- as variações da tensão principal máxima, com relação a cada nível de carga normal em função dos números de rotações utilizados, foram pequenos e ocorreram mais acentuadas para o nível de carga 12,0 daN;

- com relação aos números de rotações, o valor de 30 apresentou menores desvios padrões nos resultados obtidos da tensão principal máxima, com relação aos níveis de cargas normais e número 40 maiores;

- o nível de carga normal (pré-shear), no geral, apresentou menores valores do desvio padrão da tensão principal máxima e o de 12,0 daN os maiores. Portanto, o nível de carga normal 12,0 daN corresponde a resultados com valores mais homogêneos.

Na Tabela 27 é apresentado um resumo dos resultados das análises estatísticas realizadas com os valores da tensão principal máxima, obtidos nos testes de cisalhamento instantâneos dos produtos farinha de trigo (6 repetições) e colza (3 repetições).

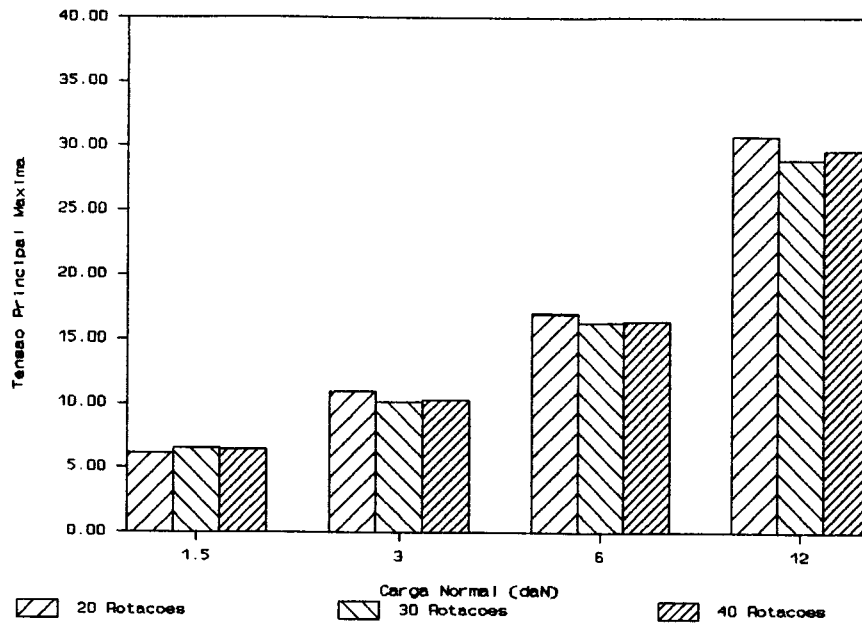


FIGURA 81. Valores médios da tensão principal máxima obtidos dos testes de cisalhamento instantâneo (farinha de trigo).

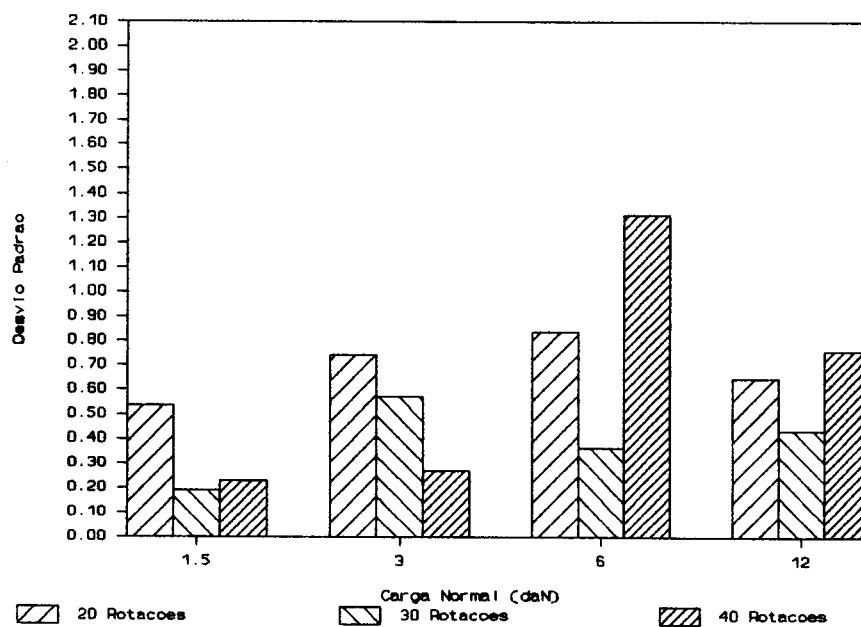


FIGURA 82. Valores médios dos desvios padrões da tensão principal máxima, obtidos dos testes de cisalhamento instantâneo (farinha de trigo).

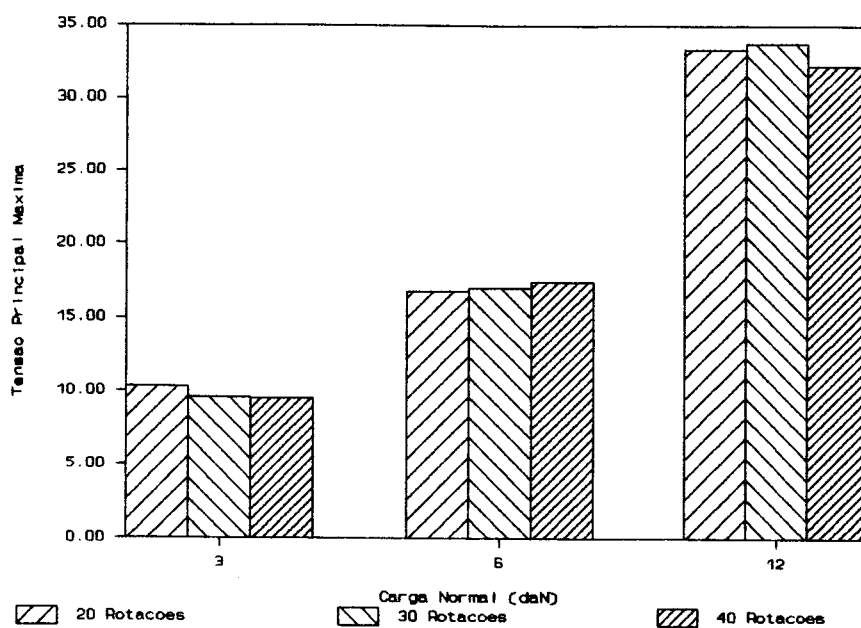


FIGURA 83. Valores médios da tensão principal máxima, obtidos dos testes de cisalhamento instantâneo (colza).

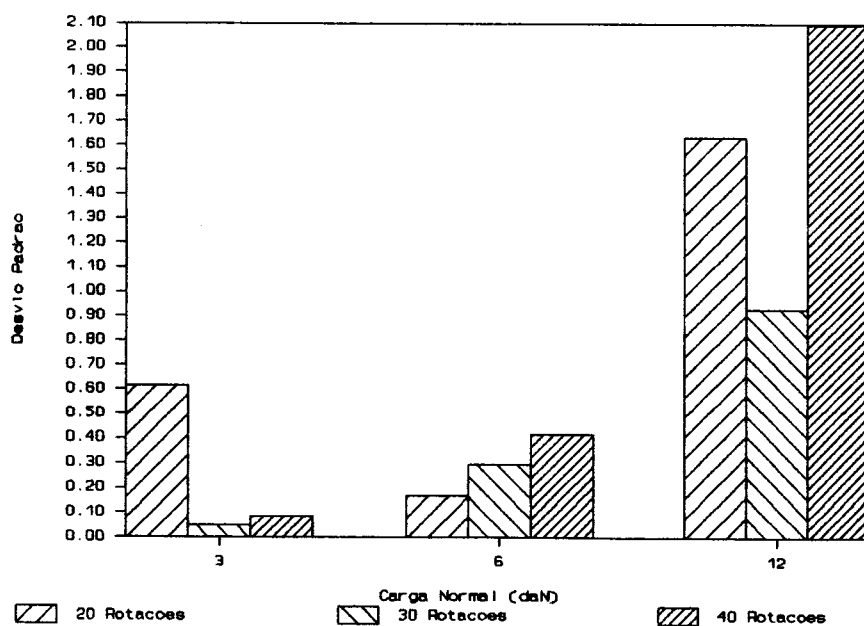


FIGURA 84. Valores médios dos desvios padrões da tensão principal máxima, obtidos dos testes de cisalhamento instantâneo (colza).

TABELA 27. Resultados das análises estatísticas dos valores da tensão principal máxima, obtidos nos testes de cisalhamento instantâneo dos produtos farinha de trigo e colza.

Estatísticas da Análise de Variância	Produtos	
	Farinha de Trigo	Colza
F (rotações)	7,95 ^{**}	4,85 [*]
F (carga normal de pré-shear)	4485,30 ^{**}	1551,78 ^{**}
f (interação: rotação x carga normal de pré-shear)	3,33 ^{**}	5,24 ^{**}
Média Geral (kN/m ²)	15,80	20,58
Desvio Padrão	0,65	0,97
Coefficiente de Variação	4,10	4,79

* - significativo a nível de 5% de probabilidade

** - significativo a nível de 1% de probabilidade

Com os resultados apresentados na Tabela 27 constata-se que:

- os valores de F obtidos, com relação aos números de rotações (20, 30 e 40) utilizados, o da farinha de trigo (7,95^{**}) e da colza (4,85^{*}) foram significativos e as diferenças nos números de rotações podem ser notadas na Figura 83;

- com relação aos níveis de cargas normais empregados, os valores de F obtidos para a farinha de trigo (4485,30^{**}) e colza (1551,78^{**}) foram significativos e as diferenças nos níveis de cargas normais podem ser notadas nas Figuras 81 (farinha de trigo) e 82 (colza), aumentam com a carga;

- da interação: carga normal (pré-shear) x rotações, os valores de F obtidos para a farinha de trigo e colza diferiram significativamente, mostrando que não há efeito de rotações em todas as cargas;

- os valores da média geral da tensão principal máxima dos produtos farinha de trigo e colza foram 15,80 e 20,58, respectivamente;

- os valores médios dos desvios padrões da tensão principal máxima para os produtos farinha de trigo e colza foram 0,65 e 0,97, respectivamente;

- os valores dos coeficientes de variação obtidos para os testes de cisalhamento instantâneo, com relação a determinação da tensão principal máxima para os produtos farinha de trigo e colza foram 4,10 e 4,79, respectivamente. Portanto, para os testes, a farinha de trigo obteve-se resultados com valores de menores variações que a colza. (indicação de testes idênticos).

5.5.4. Resistência inconfina

Os valores médios da resistência inconfina, obtidos dos testes de cisalhamento instantâneo dos produtos farinha de trigo e colza, são apresentados na Tabela 28.

A Tabela 29 apresenta um resumo dos resultados das análises estatísticas realizadas com os valores da resistência inconfina, obtidos nos testes de cisalhamento instantâneo dos produtos farinha de trigo (6 repetições) e

colza (3 repetições).

TABELA 28. Valores médios da resistência inconfiada e de seus desvios padrões dos testes de cisalhamento instantâneos (farinha de trigo e colza).

Número de Rotações	Carga Normal de Pré-Shear (daN)	Resistência Inconfiada (kN/m ²)		Desvio Padrão	
		Produtos		Produtos	
		Farinha de Trigo	Colza	Farinha de Trigo	Colza
20	1,50	0,93	-	0,92	-
	3,00	1,42	0,44	1,12	0,04
	6,00	2,22	0,54	1,51	0,10
	12,00	3,37	0,97	2,22	0,04
30	1,50	2,13	-	0,23	-
	3,00	1,96	0,48	1,08	0,10
	6,00	2,26	0,64	1,05	0,41
	12,00	3,38	1,19	0,84	0,15
40	1,50	1,46	-	1,46	-
	3,00	1,00	0,47	1,01	0,13
	6,00	2,49	0,68	1,49	0,36
	12,00	2,57	1,66	2,03	0,31

Dos valores apresentados na Tabela 28 e dos resultados das análises estatísticas (Tabela 29), em que apresentam valores altos do coeficiente de variação para farinha de trigo (64,58) e colza (28,63), indicam que os valores são muito variáveis e as médias perdem a sua representatividade, principalmente para a farinha de trigo.

Possivelmente, este fato se deve ao ajuste da reta (lugar geométrico). Portanto, os resultados obtidos da resistência inconfiada nos testes de cisalhamento instantâneo não apresentam confiabilidade, com relação ao método utilizado para determiná-los.

TABELA 29. Resultados das análises estatísticas dos valores da resistência inconfineda, determinados dos testes de cisalhamento instantâneo (farinha de trigo e colza).

Estatísticas da Análise de Variância	Produtos	
	Farinha de Trigo	Colza
F (rotações)	1,17 NS	3,70 *
F (carga normal de pré-shear)	5,93**	32,53**
f (interação: rotação x carga normal de pré-shear)	0,53NS	2,06NS
Média Geral (kN/m ²)	2,10	0,78
Desvio Padrão	1,36	0,22
Coefficiente de Variação	64,58	28,63

* - significativo a nível de 5% de probabilidade

** - significativo a nível de 1% de probabilidade

5.5.5. Densidade

Os valores médios da densidade e de seus desvios padrões, obtidos dos testes de cisalhamento instantâneo dos produtos farinha de trigo e colza, são apresentados na Tabela 30.

As Figuras 85, 86 (farinha de trigo), 87 e 88 (colza), construídas a partir dos dados da Tabela 30, apresentam valores médios da densidade (85 e 87) e de seus desvios padrões (86 e 88), com relação aos níveis de cargas normais (pré-shear) em função dos números de rotações utilizados, dos testes de cisalhamento instantâneos dos produtos farinha de trigo e colza.

TABELA 30. Valores médios da densidade e do desvio padrão dos testes de cisalhamento instantâneo dos produtos farinha de trigo e colza.

Número de Rotações	Carga Normal de Pré-Shear (daN)	Densidade (daN/m ³)		Desvio Padrão	
		Produtos		Produtos	
		Farinha de Trigo	Colza	Farinha de Trigo	Colza
20	1,50	559,76	-	24,95	-
	3,00	586,87	494,51	12,75	2,68
	6,00	604,09	493,65	11,20	5,65
	12,00	613,81	495,47	6,86	3,27
30	1,50	575,78	-	18,86	-
	3,00	595,38	490,81	10,55	4,20
	6,00	600,59	488,82	17,20	8,72
	12,00	614,41	493,37	7,03	4,54
40	1,50	580,30	-	21,06	-
	3,00	590,53	494,45	14,25	4,96
	6,00	601,62	495,30	9,15	4,67
	12,00	619,95	498,60	10,03	4,61

Dos valores da Figuras 85 e 86 (farinha de trigo) observa-se que:

- os valores da densidade tiveram pequenas variações entre si, com relação aos níveis de cargas normais (pré-shear) em função dos números de rotações utilizados, sendo mais acentuadas para o nível de carga 12,0 daN;

- o nível de carga normal (pré-shear) 12,0 daN apresentou maiores valores médios da densidade e de 1,5 daN os menores;

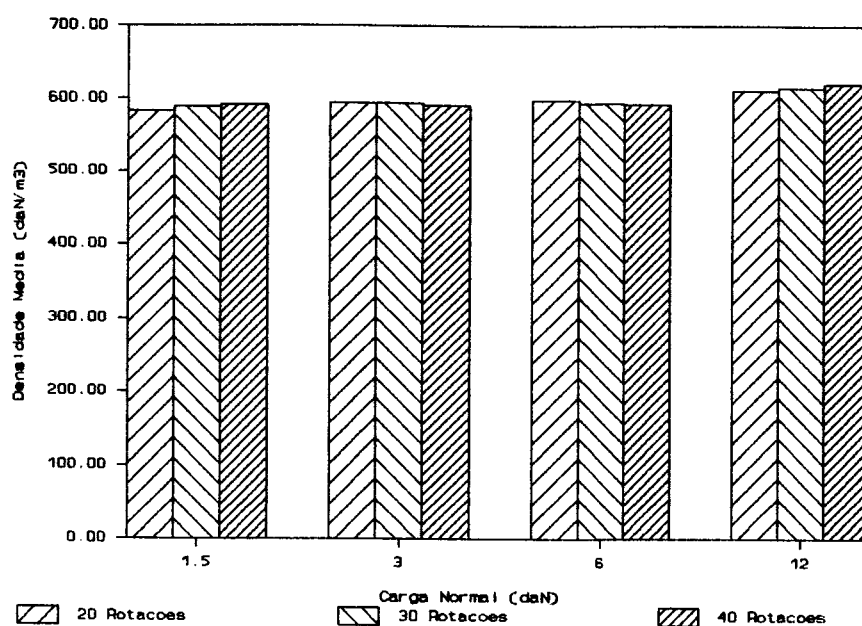


FIGURA 85. Valores médios da densidade obtidos nos testes de cisalhamento instantâneo (farinha de trigo)

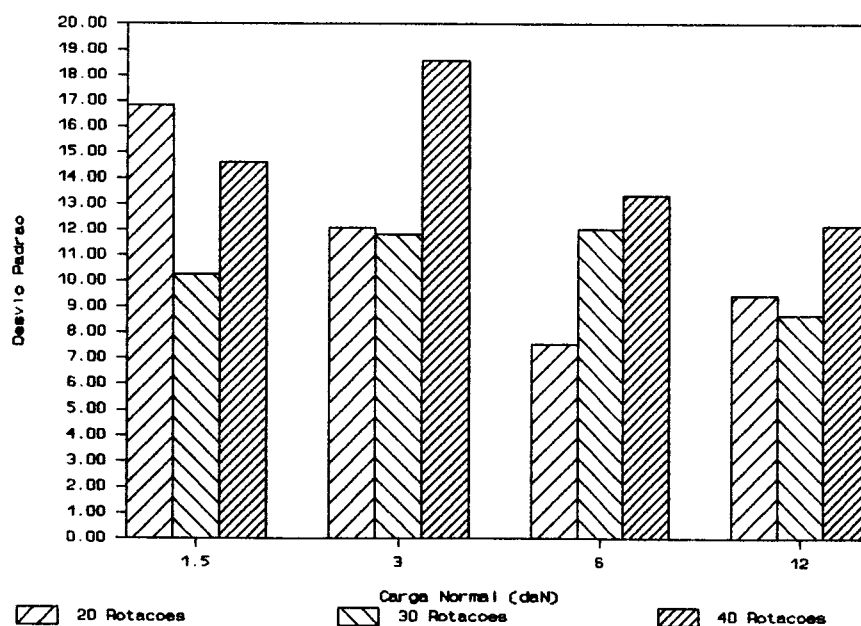


FIGURA 86. Valores médios dos desvios padrões da densidade obtidos nos testes de cisalhamento instantâneo (farinha de trigo).

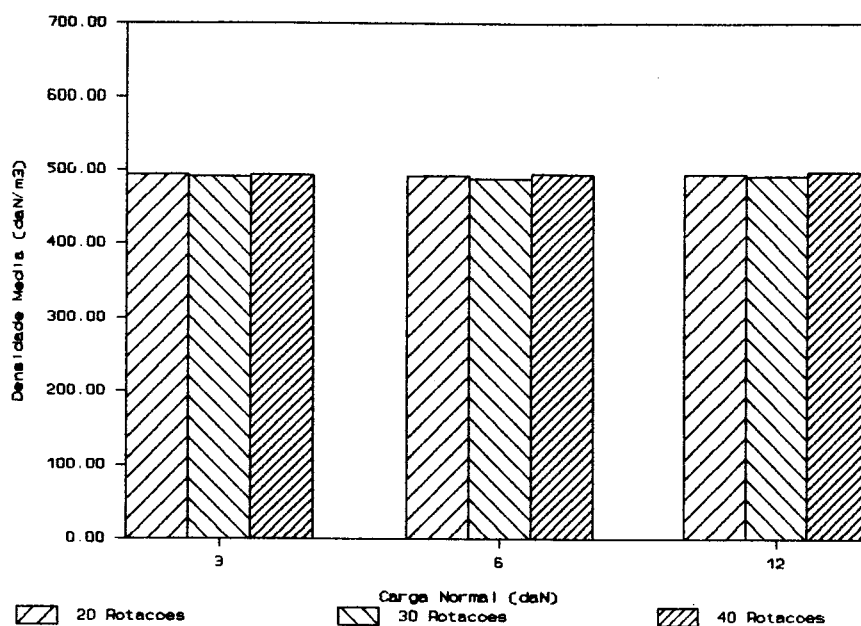


FIGURA 87. Valores médios da densidade obtidos nos testes de cisalhamento instantâneo (colza).

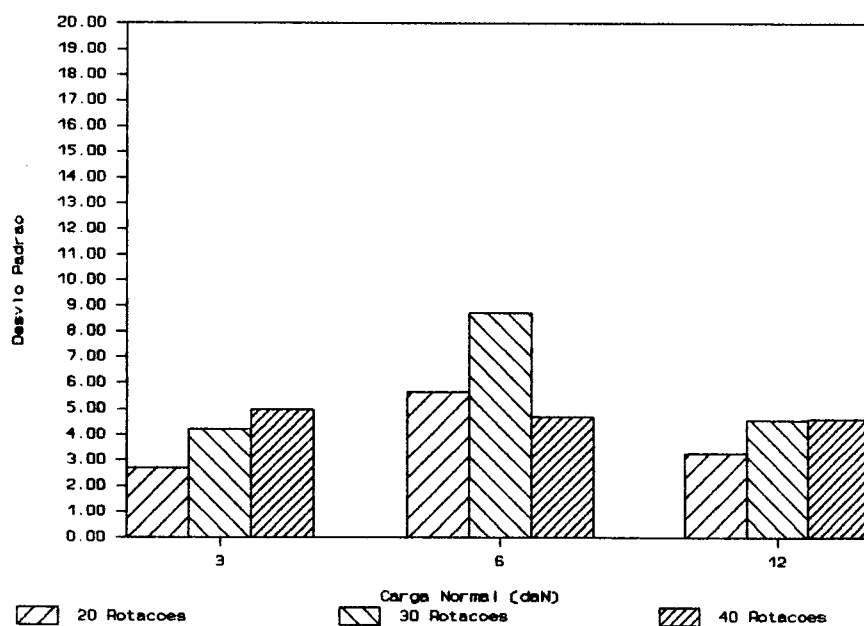


FIGURA 88. Valores médios dos desvios padrões da densidade obtidos nos testes de cisalhamento instantâneo (colza).

- os valores médios da densidade determinados com 30 rotações, com relação aos níveis de cargas normais (pré-shear), apresentaram, no geral, menores desvios padrões e o número de 40, os maiores, indicando que os valores obtidos com 30 rotações são mais confiáveis.

Os valores das Figuras 87 e 88 (colza) mostram que:

- os valores médios da densidade (Figura 87) foram praticamente os mesmos, com diferenças mínimas, com relação aos níveis de cargas normais (pré-shear) em função dos números de rotações utilizados;

- o número de 20 rotações (Figura 88), no geral, apresentou menores desvios padrões dos valores médios da densidade, com relação aos níveis de cargas normais (pré-shear) e o de 30 os maiores, indicando o número de 20 rotações obteve resultados com valores mais homogêneos.

A Tabela 31 apresenta um resumo dos resultados das análises estatísticas realizadas com valores da densidade, obtidos nos testes de cisalhamento instantâneos dos produtos farinha de trigo (6 repetições) e colza (3 repetições).

Dos resultados apresentados na Tabela 31 constata-se que:

- com relação aos números de rotações (20, 30 e 40) utilizados, os valores de F obtidos para a farinha de trigo (1,31 NS) não foi significativo e para colza (5,93 **) foram

significativos e as diferenças nos números de rotações podem ser notadas na Figura 88; a significância no caso da colza pode ser detectada devido a menor variabilidade.

TABELA 31. Resultados das análises estatísticas dos valores da densidade, obtidos dos testes de cisalhamento instatâneo dos produtos farinha de trigo (6 repetições) e colza (3 repetições).

Estatísticas da Análise de Variância	Produtos	
	Farinha de Trigo	Colza
F (rotações)	1,31 NS	5,93 ^{**}
F (carga normal de pré-shear)	13,95 ^{**}	1,27 NS
F (interação: rotação x carga normal de pré-shear)	1,24 NS	1,39 NS
Média Geral (daN/m ³)	598,78	493,89
Desvio Padrão	13,02	5,59
Coefficiente de Variação	2,17	1,13

* - significativo a nível de 5% de probabilidade

** - significativo a nível de 1% de probabilidade

- dos valores de F obtidos, com relação aos níveis de cargas normais (pré-shear) empregados, os da farinha de trigo (13,95^{**}) foram significativos e as diferenças nos níveis de cargas normais podem ser notadas na Figura 85;

- da interação: carga normal (pré-shear) x rotações, os valores de F obtidos para a farinha de trigo (1,24 NS) e colza (1,39 NS) não foram significativos;

- os valores da média geral da densidade dos

produtos farinha de trigo e colza foram 598,78 e 493,29 daN/m³, respectivamente;

- os valores médios dos desvios padrões da densidade foram 13,02 e 5,59 para os produtos farinha de trigo e colza, respectivamente;

- os valores do coeficiente de variação obtidos para os testes de cisalhamento instantâneo, com relação a determinação da densidade dos produtos farinha de trigo e colza foram 2,17 e 1,13, respectivamente, indicando que os valores obtidos nos testes da colza tem menores variações do que a da farinha de trigo.

5.6. Teste de Cisalhamento com Tempo de Consolidação

São apresentados na Tabela 32 os valores médios das tensões normais e de cisalhamento e de seus desvios padrões com relação aos níveis de cargas normais (pré-shear e shear) em função dos tempos de consolidação utilizados, obtidos nos testes de cisalhamento com tempo dos produtos farinha de trigo (6 repetições) e colza (3 repetições).

TABELA 32. Valores médios das tensões normais e de cisalhamento e de seus desvios padrões, com relação aos níveis de cargas normais (shear e pré-shear) em função dos números de rotações dos testes de cisalhamento com tempo dos produtos farinha de trigo e colza.

Tempo (horas)	Carga Normal (daN)				Tensões (kN/m ²)				Desvio Padrão - Tensões			
	Pré-Shear		Shear		Normal (σ) Produto		Cisalhamento (τ) Produto		Normal (σ) Produto		Cisalhamento (τ) Produto	
	Farinha de Trigo	Colza	Farinha de Trigo	Colza	Farinha de Trigo	Colza	Farinha de Trigo	Colza	Farinha de Trigo	Colza	Farinha de Trigo	Colza
0	12,00	3,00	3,00	-	5,47	-	4,32	-	0,00	-	0,16	-
			5,00	1,50	8,36	3,30	6,52	2,03	0,00	0,00	0,57	0,03
			7,00	2,00	11,25	4,02	8,13	2,44	0,00	0,00	0,26	0,03
			9,00	2,50	14,13	4,74	9,92	2,79	0,00	0,00	0,23	0,01
6	12,00	3,00	3,00	-	5,46	-	4,08	-	0,00	-	0,27	-
			5,00	1,50	8,36	3,30	5,96	2,23	0,00	0,00	0,28	0,16
			7,00	2,00	11,25	4,02	7,86	2,63	0,00	0,00	0,36	0,25
			9,00	2,50	14,13	4,74	9,73	3,09	0,00	0,00	0,31	0,12
24	12,00	3,00	3,00	-	5,47	-	3,97	-	0,00	-	0,13	-
			5,00	1,50	8,36	3,30	5,94	2,03	0,00	0,00	0,26	0,11
			7,00	2,00	11,25	4,02	7,85	2,52	0,00	0,00	0,20	0,19
			9,00	2,50	14,13	4,74	9,24	2,99	0,00	0,00	0,24	0,17
48	12,00	3,00	3,00	-	5,47	-	4,06	-	0,00	-	0,26	-
			5,00	1,50	8,36	3,30	5,76	2,05	0,00	0,00	0,43	0,06
			7,00	2,00	11,25	4,02	7,33	2,51	0,00	0,00	0,21	0,04
			9,00	2,50	14,13	4,74	9,04	3,01	0,00	0,00	0,07	0,04
72	12,00	3,00	0,40	-	5,47	-	4,70	-	0,00	-	0,20	-
			0,60	1,50	8,36	3,30	6,55	2,01	0,00	0,00	0,38	0,00
			0,80	2,00	11,25	4,02	8,13	2,70	0,00	0,00	0,19	0,07
			1,00	2,50	14,13	4,74	10,08	3,22	0,00	0,00	0,15	0,00

5.6.1. Efetivo ângulo de atrito de tempo

A Tabela 33 apresenta os valores médios do efetivo ângulo de atrito de tempo e de seus desvios padrões, com relação aos níveis de cargas (pré-shear e shear), em função dos tempos de consolidação utilizados, obtidos nos testes de

cisalhamento de tempo com os produtos farinha de trigo e colza.

TABELA 33. Valores médios do efetivo ângulo de atrito de tempo e de seus desvios padrões, obtidos nos testes de cisalhamento de tempo dos produtos farinha de trigo e colza.

Tempo (horas)	Carga Normal de Pré-Shear (daN)		Efetivo Ângulo de Atrito de Tempo (graus)		Desvios Padrões	
	Produtos		Produtos		Produtos	
	Farinha de Trigo	Colza	Farinha de Trigo	Colza	Farinha de Trigo	Colza
0	12,00	3,00	35,36	33,00	1,07	0,48
6,00	12,00	3,00	34,75	32,95	0,95	0,70
24,00	12,00	3,00	33,48	32,26	0,59	0,56
48,00	12,00	3,00	32,50	32,62	0,48	0,39
72,00	12,00	3,00	35,64	33,08	0,24	0,08

As Figuras 89, 90 (farinha de trigo), 91 e 92 (colza), construídas a partir dos dados da Tabela 32, apresentam os valores médios do efetivo ângulo de atrito de tempo (89 e 91) e de seus desvios padrões (90 e 92), com relação aos tempos de consolidação utilizados.

Para as Figuras 89 (farinha de trigo) e 91 (colza) verifica-se que, os valores determinados do efetivo ângulo de atrito de tempo tiveram comportamentos surpreendentes, partindo de uma média (35,36 - farinha de trigo e 33,0 - colza) com tempo 0, diminuindo para os de 6, 24 e 48 horas e voltando para 72 (35,64 - farinha de trigo e 33,08 - colza) com praticamente o mesmo valor do tempo 0. Possivelmente, este fato se deve aos movimentos ocasionados pelo transporte das células de ida a bancada de consolidação e de volta a máquina de ensaio.

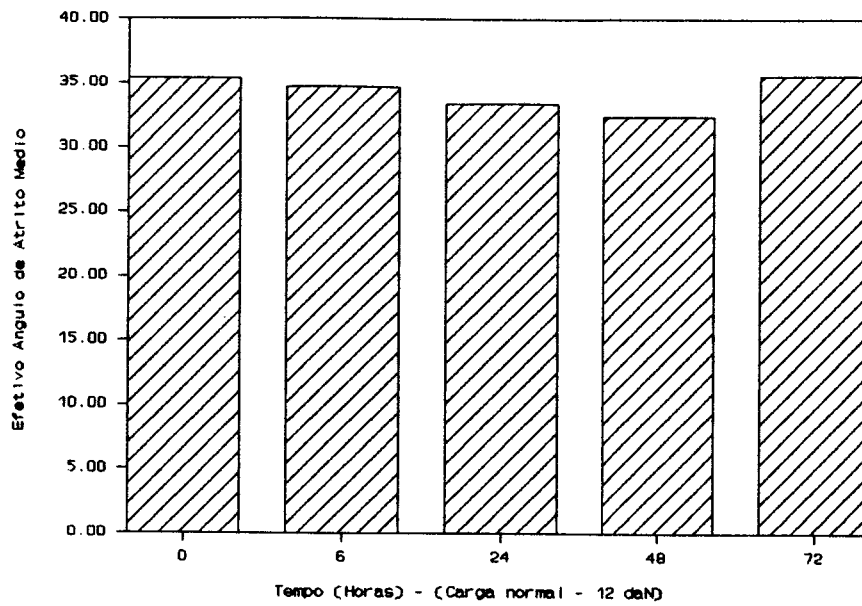


FIGURA 89. Valores médios do efetivo ângulo de atrito de tempo, obtidos nos testes de cisalhamento com tempo (farinha de trigo).

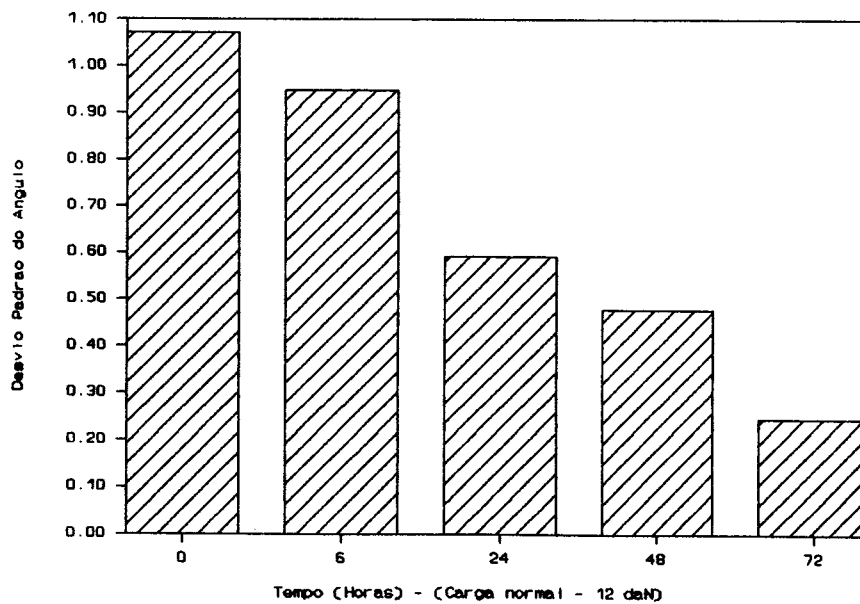


FIGURA 90. Valores médios dos desvios padrões do efetivo ângulo de atrito de tempo, obtidos nos testes de cisalhamento com tempo (farinha de trigo).

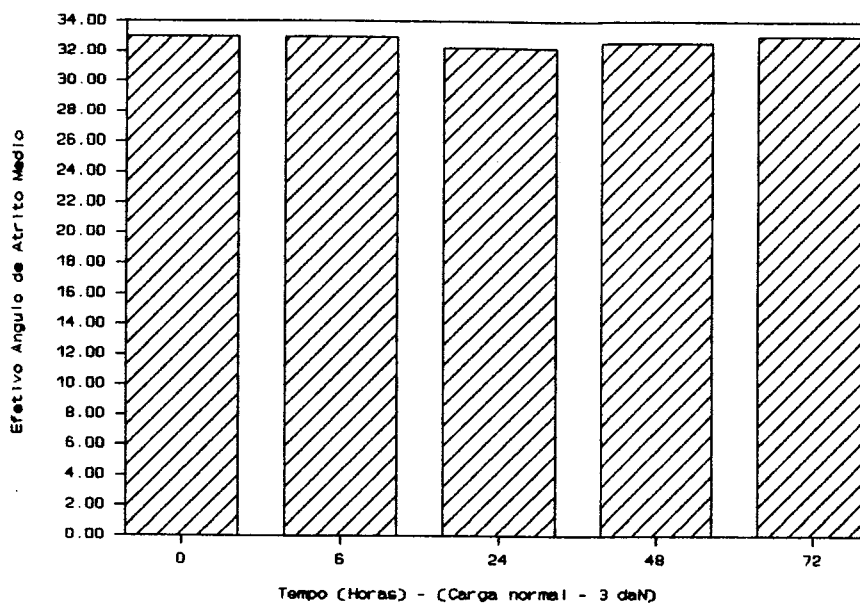


FIGURA 91. Valores médios do efetivo ângulo de atrito de tempo, obtidos nos testes de cisalhamento com tempo (colza).

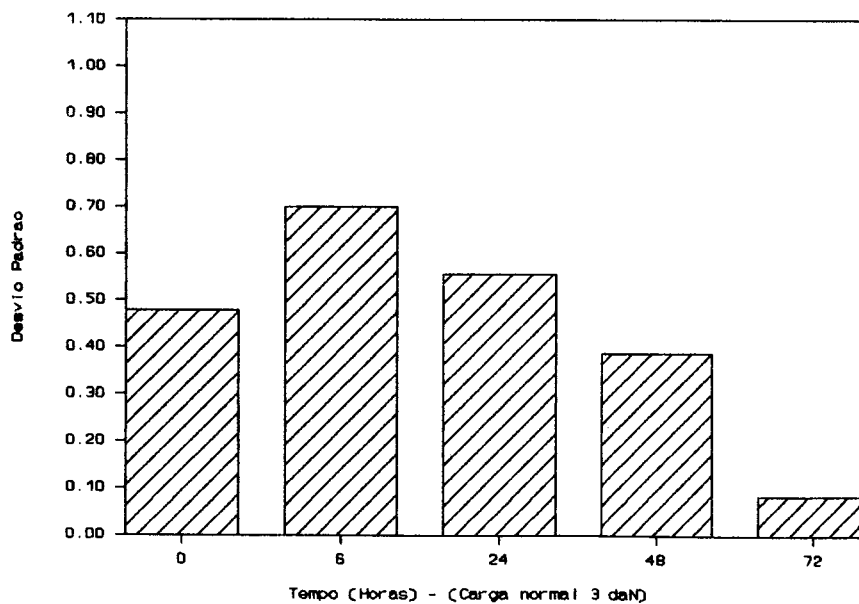


FIGURA 92. Valores médios dos desvios padrões do efetivo ângulo de atrito de tempo, obtidos nos testes de cisalhamento com tempo (colza).

Das Figuras 90 (farinha de trigo) e 91 (colza) observa-se que:

- os valores dos desvios padrões do efetivo ângulo de atrito de tempo determinados para a farinha de trigo e colza foram máximos para o tempo 0 e 6 horas, respectivamente, e mínimos para os de 72 horas, ou seja, a medida do efetivo ângulo de atrito é mais confiante para 72 horas.

A Tabela 34 apresenta um resumo dos resultados das análises estatísticas dos valores do efetivo ângulo de atrito, obtidos dos testes de cisalhamento de tempo dos produtos farinha de trigo e colza.

TABELA 34. Resultados das análises estatísticas dos valores do efetivo ângulo de atrito de tempo, determinados dos testes de cisalhamento de tempo (farinha de trigo - 06 repetições e colza - 3 repetições).

Estatísticas da Análise de Variância	Produtos	
	Farinha de Trigo	Colza
F (tempo)	19,50**	0,83NS
Média Geral (graus)	34,35	32,87
Desvio Padrão	0,73	0,82
Coefficiente de Variação	2,13	2,51

* - significativo a nível de 5% de probabilidade

** - significativo a nível de 1% de probabilidade

Dos resultados apresentados na Tabela 34 verifica-se que:

- com relação aos intervalos de tempo utilizados, os valores de F obtidos para a farinha de trigo ($19,50^{**}$) foram significativos e a diferença nos intervalos de tempo podem ser notadas na Figura 89 e da colza foi não significativo;

- os valores da média geral do efetivo ângulo de atrito, obtidos nos testes de cisalhamento com tempo foram 34,45 e 32,87 para os produtos farinha de trigo e colza, respectivamente. Fazendo uma comparação com os valores obtidos nos testes de cisalhamento instantâneos 35,67 (farinha de trigo) e 32,39 (colza), apresentados na Tabela 25, nota-se que a diferença entre eles foram pequenas e a influência do tempo teve pouca importância. Possivelmente, essas diferenças tenham ocorrido devido as transferências das células à bancada de consolidação e de volta à máquina de ensaio;

- os valores médios dos desvios padrões do efetivo ângulo de atrito foram 0,73 e 0,82 para os produtos farinha de trigo e colza, respectivamente; possivelmente esta diferença resida no fato da colza ser um produto granular, sofrendo maior influência nas transferências das células;

- os valores do coeficiente de variação obtidos para os testes de cisalhamento com tempo, com relação a determinação do efetivo ângulo de atrito dos produtos farinha de trigo e colza foram 2,13 e 2,51, respectivamente; indicando que os valores obtidos nos testes da colza tem maiores variações do que os da farinha de trigo, possivelmente por sofrer maiores influências nas operações dos testes.

5.6.2. Resistência inconfínada de tempo

Os valores médios da resistência inconfínada de tempo e de seus desvios padrões, obtidos nos testes de cisalhamento de tempo dos produtos farinha de trigo e colza, são apresentados na Tabela 35.

TABELA 35. Valores médios da resistência inconfínada de tempo e seus desvios, obtidos nos testes de cisalhamento com tempo dos produtos farinha de trigo e colza.

Tempo (horas)	Resistência Inconfínada Média (kN/m ²)		Desvios Padrões	
	Produtos		Produtos	
	Farinha de Trigo	Colza	Farinha de Trigo	Colza
0	3,38	0,44	0,84	0,10
6,00	2,11	1,40	1,30	0,56
24,00	2,71	1,74	0,57	1,21
48,00	3,68	0,61	0,85	0,60
72,00	4,80	0,44	1,55	0,10

Dos valores apresentados na Tabela 35 e dos resultados obtidos das análises estatísticas preliminares, em que os testes de cisalhamento com tempo apresentaram coeficientes de variações 32,42 e 70,40 para os produtos farinha de trigo e colza, respectivamente; indicam que as médias são muito variáveis e perdem a sua representatividade. Possivelmente, este fato se deva não só ao ajuste da reta (lugar geométrico) mas também, a transferência das células à bancada de consolidação e de volta a máquina de ensaio. Portanto, os resultados obtidos nos testes de cisalhamento com tempo de consolidação não apresentam confiabilidade.

5.7. Teste de Cisalhamento de Atrito com a Parede Instantâneo

Para a construção dos lugares geométricos da parede, verificou-se antes os comportamentos dos pontos das tensões normais e de cisalhamento (Tabelas 36 - farinha de trigo e 37 - colza), obtidos nos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa e rugosa) instantâneo, com relação à equação que melhor se adapta, curva ou reta, sendo que foi analisado em cada situação a diferença, em termos de soma de quadrados linear e quadrática. Essa diferença mostrou-se sempre não significativa, a nível de 5% de probabilidade, optando-se então pelo uso da equação linear simples.

TABELA 36. Valores médios das tensões normais e de cisalhamento e de seus desvios padrões, com relação aos níveis de cargas normais, em função dos números de rotações utilizados, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa e rugosa) instantâneos do produto farinha de trigo.

Número de Rotações	Carga Normal (daN)	Tensões kN/m ²				Desvio Padrão - Tensões			
		Normal (σ) Parede		Cisalhamento (τ) Parede		Normal (σ) Parede		Cisalhamento (τ) Parede	
		Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa
0	0,00	0,30	0,30	0,39	0,57	0,00	0,00	0,01	0,02
	1,00	1,73	1,73	0,70	1,15	0,00	0,00	0,09	0,04
	2,00	3,18	3,18	0,96	1,72	0,00	0,00	0,07	0,05
	3,00	4,63	4,63	1,25	2,29	0,00	0,00	0,09	0,05
	4,00	6,07	6,07	1,59	2,87	0,00	0,00	0,05	0,09
	5,00	7,51	3,51	1,94	3,46	0,00	0,00	0,09	0,12
20	0,00	0,30	0,30	0,36	0,56	0,00	0,00	0,04	0,02
	1,00	1,73	1,73	0,65	1,16	0,00	0,00	0,03	0,15
	2,00	3,18	3,18	0,94	1,67	0,00	0,00	0,07	0,11
	3,00	4,63	4,63	1,22	2,20	0,00	0,00	0,01	0,16
	4,00	6,07	6,07	1,53	2,76	0,00	0,00	0,02	0,19
	5,00	7,51	3,51	1,87	3,37	0,00	0,00	0,03	0,24

continua ...

Número de Rotações	Carga Normal (daN)	Tensões kN/m ²				Desvio Padrão - Tensões			
		Normal (σ) Parede		Cisalhamento (τ) Parede		Normal (σ) Parede		Cisalhamento (τ) Parede	
		Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa
continuação da Tabela 36									
	0,00	0,30	0,30	0,37	0,57	0,00	0,00	0,01	0,03
	1,00	1,73	1,73	0,64	1,13	0,00	0,00	0,02	0,04
	2,00	3,18	3,18	0,92	1,67	0,00	0,00	0,04	0,05
	3,00	4,63	4,63	1,17	2,23	0,00	0,00	0,03	0,05
	4,00	6,07	6,07	1,46	2,80	0,00	0,00	0,03	0,06
	5,00	7,51	3,51	1,82	3,41	0,00	0,00	0,03	0,05
30	0,00	-	0,30	-	0,49	-	0,00	-	0,04
	1,50	-	2,47	-	1,17	-	0,00	-	0,03
	3,00	-	4,63	-	1,81	-	0,00	-	0,09
	6,00	-	8,97	-	3,12	-	0,00	-	0,13
	9,00	-	13,30	-	4,41	-	0,00	-	0,20
	12,00	-	17,64	-	5,78	-	0,00	-	0,33
	0,00	0,30	0,30	0,33	0,44	0,00	0,00	0,03	0,04
	0,50	1,02	1,02	0,44	0,67	0,00	0,00	0,06	0,04
	2,00	3,18	3,18	0,85	1,42	0,00	0,00	0,09	0,05
	5,00	7,51	7,51	1,61	2,81	0,00	0,00	0,08	0,10
	10,00	14,74	14,74	2,92	5,04	0,00	0,00	0,09	0,21
	15,00	21,97	21,97	4,25	7,22	0,00	0,00	0,17	0,33
40	0,00	0,30	0,30	0,39	0,54	0,00	0,00	0,01	0,01
	1,00	1,73	1,73	0,70	1,05	0,00	0,00	0,01	0,07
	2,00	3,18	3,18	0,95	1,57	0,00	0,00	0,01	0,12
	3,00	4,63	4,63	1,24	2,07	0,00	0,00	0,04	0,17
	4,00	6,07	6,07	1,58	2,58	0,00	0,00	0,03	0,25
	5,00	7,51	7,51	3,16	3,16	0,00	0,00	0,03	0,27

Os valores médios do ângulo de atrito da parede e de seus desvios padrões, com relação aos números de cargas normais em função dos números de rotações utilizados, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa e rugosa) instantâneos dos produtos farinha de trigo e colza, são apresentados nas Tabelas 38 e 39, respectivamente.

TABELA 37. Valores médios da tensões normais e de cisalhamento e de seus desvios padrões, com relação aos níveis de cargas normais em função dos números de rotações utilizados, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa e rugosa) instantâneos do produto colza.

Número de Rotações	Carga Normal (daN)	Tensões kN/m^2				Desvio Padrão - Tensões			
		Normal (σ) Parede		Cisalhamento (τ) Parede		Normal (σ) Parede		Cisalhamento (τ) Parede	
		Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa
20	0,00	0,30	0,30	0,48	0,44	0,00	0,00	0,01	0,01
	1,00	1,73	1,73	0,94	0,94	0,00	0,00	0,01	0,00
	2,00	3,18	3,18	1,33	1,42	0,00	0,00	0,09	0,03
	3,00	4,63	4,63	1,81	1,92	0,00	0,00	0,01	0,04
	4,00	6,07	6,07	2,20	2,39	0,00	0,00	0,03	0,02
	5,00	7,51	7,51	2,54	2,81	0,00	0,00	0,03	0,07
	0,00	0,30	0,30	0,37	0,41	0,00	0,00	0,01	0,02
	0,50	1,02	1,02	0,53	0,60	0,00	0,00	0,05	0,02
	2,00	3,18	3,18	1,00	1,20	0,00	0,00	0,14	0,04
	5,00	7,51	7,51	1,90	2,38	0,00	0,00	0,23	0,07
	10,00	14,74	14,74	3,35	4,33	0,00	0,00	0,34	0,14
	15,00	21,97	21,97	4,40	6,36	0,00	0,00	0,07	0,14

Com os valores do ângulo de atrito da parede apresentados na Tabela 38 (farinha de trigo) verificaram-se:

a) influência dos números de rotações (0, 20, 30 e 40) sobre os resultados do ângulo de atrito da parede, obtidos com relação a um nível de carga normal (5 daN).

TABELA 38. Valores médios do ângulo de atrito da parede e de seus desvios padrões, obtidos nos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa e rugosa) do produto farinha de trigo.

Número de Rotações	Carga Normal (daN)	Âng. Atrito da Parede (graus)		Desvio Padrão	
		Parede		Parede	
		Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa
0	5,00	11,96	21,73	0,25	0,74
20	5,00	11,64	20,94	0,25	1,58
	5,00	11,16	21,41	0,26	0,37
30	12,00	-	17,41	-	0,98
	15,00	10,22	17,38	0,39	0,71
40	5,00	11,50	19,71	0,37	1,91

TABELA 39. Valores médios do ângulo de atrito da parede e de seus desvios padrões, obtidos nos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa e rugosa) instantâneos do produto colza.

Número de Rotações	Carga Normal (daN)	Âng. Atrito da Parede (graus)		Desvio Padrão	
		Parede		Parede	
		Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa
20	5,00	16,02	18,28	0,20	0,45
	15,00	10,73	15,30	0,33	0,35

As Figuras 93, 94 (parede lisa), 95 e 96 (parede rugosa), construídas a partir dos dados das Tabelas 38, apresentam os valores médios do ângulo de atrito da parede e de seus desvios padrões, com relação ao nível de carga normal 5

daN em função dos números de rotações (0, 20, 30 e 40) utilizados, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa e rugosa) instantâneos para o produto farinha de trigo.

Das Figuras 93, 94 (parede lisa), 95 e 96 (parede rugosa) verifica-se que:

- com relação aos valores médios dos ângulos de atrito da parede obtidos, os da parede lisa (Figura 93) apresentaram praticamente os mesmos valores, com diferenças mínimas e os de parede rugosa tiveram pequenas diferenças entre eles, com o máximo valor para 0 (zero) rotações e o mínimo para 40. Portanto, a influência do número de rotações nos resultados da parede rugosa se mostraram maiores do que os da parede lisa.

- os valores médios do desvio padrão do ângulo de atrito da parede, obtidos para a parede lisa (Figura 94), apresentaram valores máximos para número de 0 (zero) rotações e mínimo para os de 20 e 30 e os da parede rugosa foram máximos e mínimos para 20 e 40 rotações. Isto indica que os valores dos ângulos de atrito determinados com 30 rotações são mais homogêneos.

A Tabela 40 apresenta um resumo dos resultados das análises estatísticas dos valores do ângulo de atrito da parede, com relação aos nível de carga normal 5 daN, em função dos números de rotações utilizados, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa e rugosa) instantâneos, do produto farinha de trigo (6 repetições).



FIGURA 93. Valores médios do ângulo de atrito da parede, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa) instantâneo (farinha de trigo).

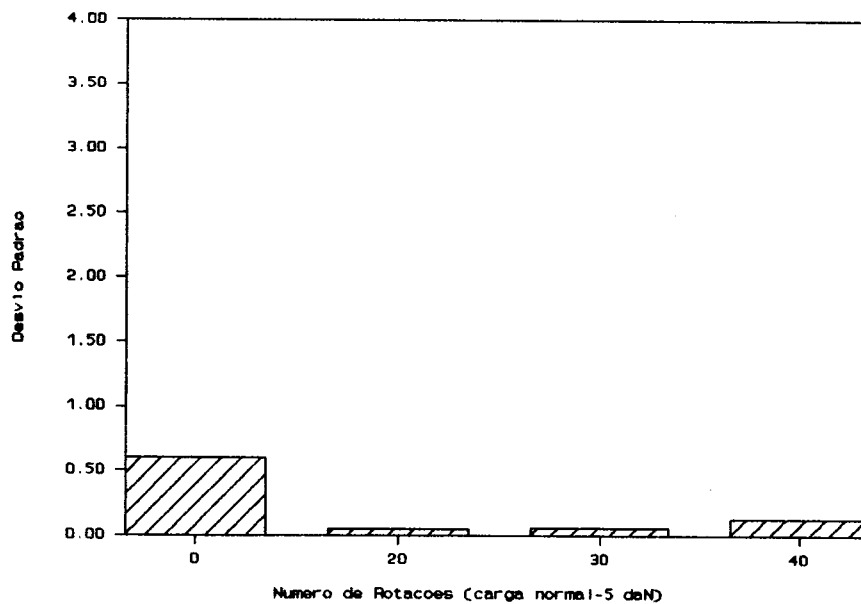


FIGURA 94. Valores médios do desvio padrão do ângulo de atrito da parede, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito da parede (lisa) instantâneo (farinha de trigo).

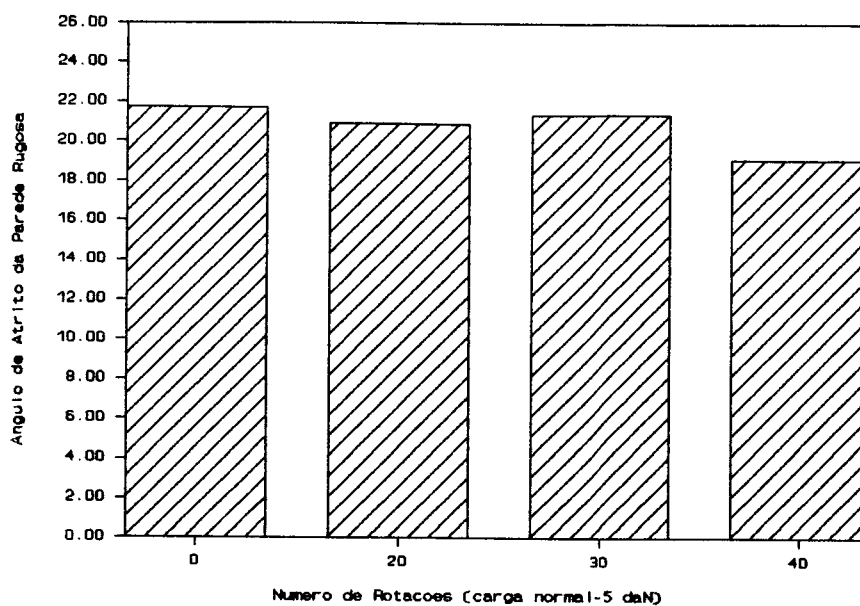


FIGURA 95. Valores médios do ângulo de atrito da parede, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (rugosa) instantâneo (farinha de trigo).

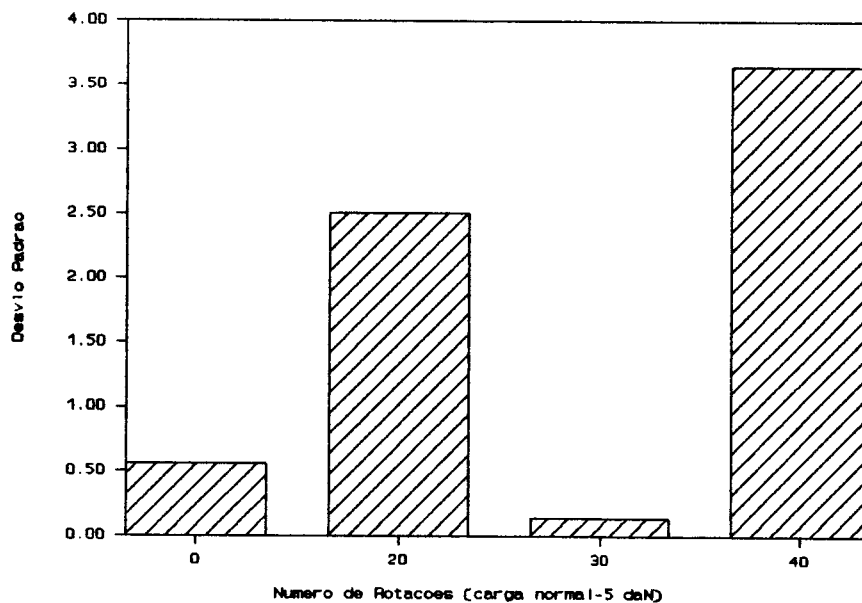


FIGURA 96. Valores médios do desvio padrão do ângulo de atrito da parede, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (rugosa) instantâneo (farinha de trigo).

TABELA 40. Resultados das análises estatísticas dos valores do ângulo de atrito da parede, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito da parede (lisa e rugosa) instantâneos (farinha de trigo).

Estatísticas da Análise de Variância	Paredes	
	Lisa	Rugosa
F (rotações)	8,17 **	2,74NS
Média Geral (graus)	11,57	20,95
Desvio Padrão	0,28	1,31
Coeficiente de Variação	2,45	6,25

* - significativo a nível de 5% de probabilidade

** - significativo a nível de 1% de probabilidade

Com os resultados apresentados na tabela 40 verifica-se que:

- com relação aos números de rotações (0, 20, 30 e 40) utilizados, os valores de F obtidos para a parede lisa (8,17 **) foram significativos e as diferenças nos números de rotações podem ser notadas na Figura 93 e os da rugosa (2,74 NS) foram não significativos;

- os valores da análise geral do ângulo de atrito da parede foram 11,57 e 20,95 para as paredes lisa e rugosa, respectivamente, apresentando-se pequenas diferenças com seus respectivos valores citados na Tabela 38, determinados em função do número de rotações utilizados. Portanto, pode-se considerar que o número de rotações não interfere diretamente nos resultados;

- os valores médios dos desvios padrões do ângulo de atrito da parede foram 0,28 e 1,31 para os das paredes lisa e rugosa, respectivamente;

- os valores do coeficiente de variação obtidos para os testes de cisalhamento de atrito com a parede, com relação a determinação dos ângulos de atrito da parede foram 2,45 e 6,25 para as paredes lisa e rugosa, respectivamente. Portanto, os resultados dos testes com a parede lisa apresentaram menores variações do que os da parede rugosa.

Para os valores dos ângulos de atrito da parede que tiveram, no geral, menores desvios padrões, com relação ao nível de carga 5 daN em função dos números de rotações utilizados, a farinha de trigo (30 rotações) apresentou para a parede lisa um valor médio de 11,16 e 0,26 para o desvio padrão e a rugosa 21,41 e 0,37.

Utilizando-se a fórmula do erro para a estimativa da média:

$$erro = 2 \frac{S}{\sqrt{r}}$$

onde:

S = desvio padrão médio

r = número de repetições

os valores obtidos dos erros para o ângulo médio de atrito da parede (6 repetições) foram 0,10 (0,95%) e 0,15 (0,70%) para paredes lisa e rugosa, respectivamente. Portanto, mostram que existe uma confiança de 95%; que os valores médios verdadeiros

dos ângulos de atrito da parede estejam dentro dos intervalos de $11,16 \pm 0,10$ para a parede lisa e $21,41 \pm 0,15$ para a rugosa

b) Efeito dos níveis de cargas normais (5,0; 12,0 e 15,0 daN) sobre os resultados do ângulo de atrito, obtidos em função do número de 30 rotações utilizados.

b1) Parede Lisa

Para os valores médios do ângulo de atrito da parede 11,16 e 10,22 (Tabela 38), obtidos com os níveis de cargas normais 5,0 e 15 daN, respectivamente, constata-se que a diferença entre eles foi pequena, indicando que o efeito dos níveis de cargas normais sobre os resultados interfere muito pouco.

b2) Parede Rugosa

As Figuras 97 e 98 construídas a partir dos dados da Tabela 38, apresentam os valores médios do ângulo de atrito e de seus desvios padrões, com relação aos níveis de cargas normais 5,0; 12,0 e 15,0 daN, em função do número de 30 rotações utilizados, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (rugosa) instantâneos do produto farinha de trigo.

Para as figuras 97 e 98 verifica-se que:

- com relação aos valores médios do ângulo de atrito da parede obtidos, os níveis de cargas normais 12,0 e 15,0 daN apresentaram os valores mínimos, sendo praticamente iguais (diferença mínima) e o de 5 daN o máximo, indicando que a carga normal interfere nos resultados dos testes até um certo

nível e que, a partir dele, pode-se considerar que ela não influencia.

- com relação aos valores médios dos desvios padrões do ângulo de atrito da parede, o nível de carga 5,0 daN foi o valor mínimo e de 12,0 daN o máximo.

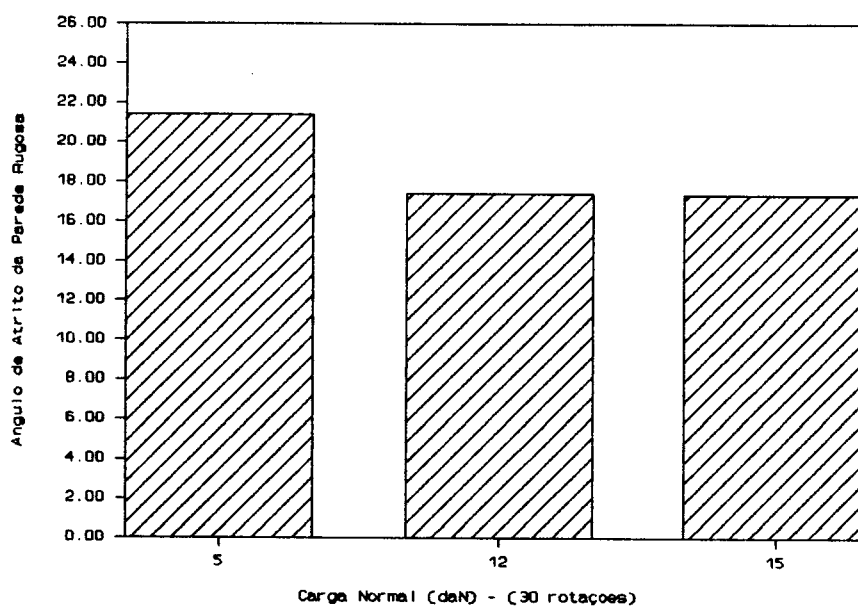


FIGURA 97. Valores médios do ângulo de atrito da parede, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (rugosa) instantâneos (farinha de trigo).

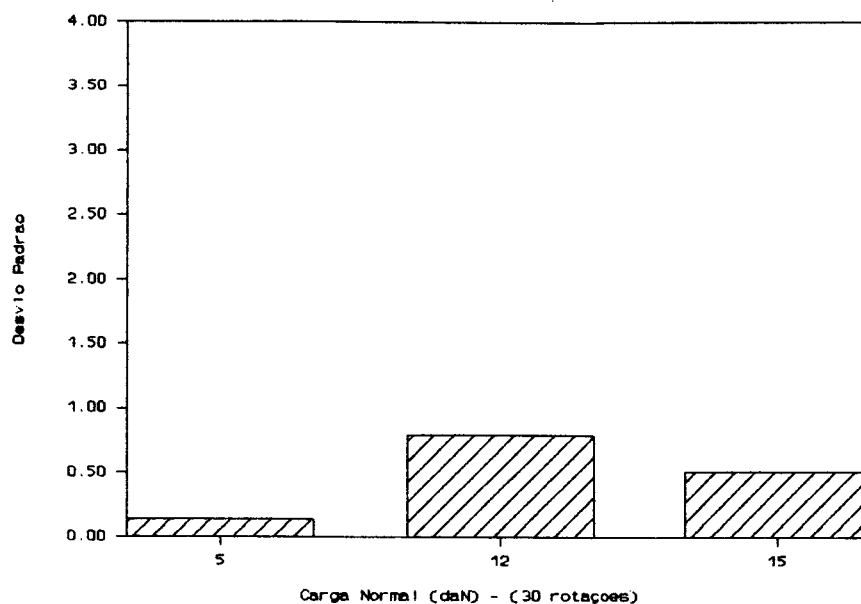


FIGURA 98. Valores médios do desvio padrão do ângulo de atrito da parede, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (rugosa) instantâneo (farinha de trigo).

As Figuras 99, 100 (parede lisa), 101 e 102 (parede rugosa) construídas a partir da Tabela 39, apresentam os valores médios do ângulo de atrito da parede e de seus desvios padrões, com relação aos níveis de cargas normais (5,0 e 15,0 daN) em função do número de 30 rotações utilizado, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa e rugosa) instantâneo do produto colza.

Das Figuras 99 (parede lisa) e 101 (parede rugosa) observa-se que os valores médios do ângulo de atrito da parede da colza foram maiores para o nível de carga normal 5,0

daN e a maior diferença entre os valores das cargas normais 5,0 e 15,0 daN ocorreu com a parede lisa (Figura 99), indicando que os níveis de cargas normais influenciam nos resultados obtidos.

Das Figuras 100 (parede lisa) e 102 (parede rugosa) verifica-se que os valores médios dos desvios padrões do ângulo de atrito da parede foram pequenos e apresentaram-se máximos para os níveis de cargas normais 5,0 e 15,0 daN das paredes rugosa e lisa, respectivamente; indicando que elas tiveram valores (máximos e mínimos) contrários com relação aos níveis de cargas normais.

Com auxílio da fórmula do erro para a estimativa da média:

$$\text{erro} = 2 \frac{S}{\sqrt{r}}$$

onde:

S = desvio padrão médio

r = número de repetições

e utilizando resultados do ângulo de atrito da parede apresentados na Tabela 39, com relação ao nível de carga normal 5,0 daN, obtém-se os seguintes erros: 0,11 (0,72% e 0,26 (1,42%) para os valores das paredes lisa e rugosa, respectivamente. Portanto, indicam que existe uma confiança de 95%; que os valores médios verdadeiros do ângulo de atrito da parede estejam dentro dos intervalos de $16,02 \pm 0,11$ para a parede lisa e $18,28 \pm 0,26$ para rugosa.

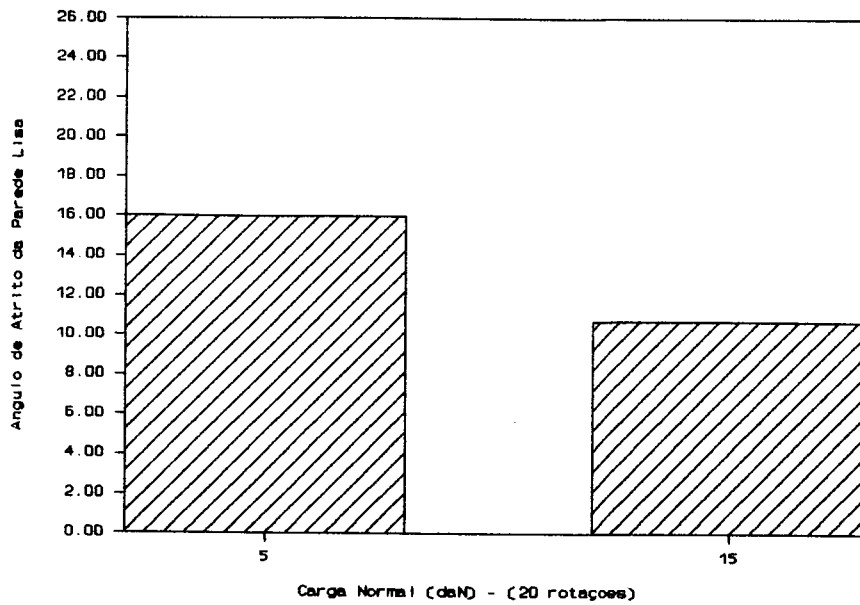


FIGURA 99. Valores médios do ângulo de atrito da parede, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa) instantâneo (colza).

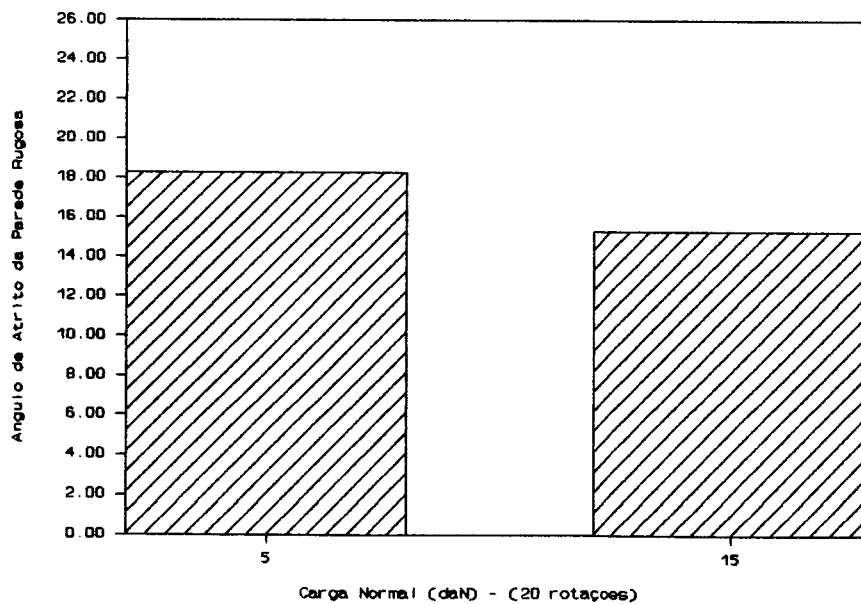


FIGURA 100. Valores médios do ângulo de atrito da parede, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (rugosa) instantâneos (colza).

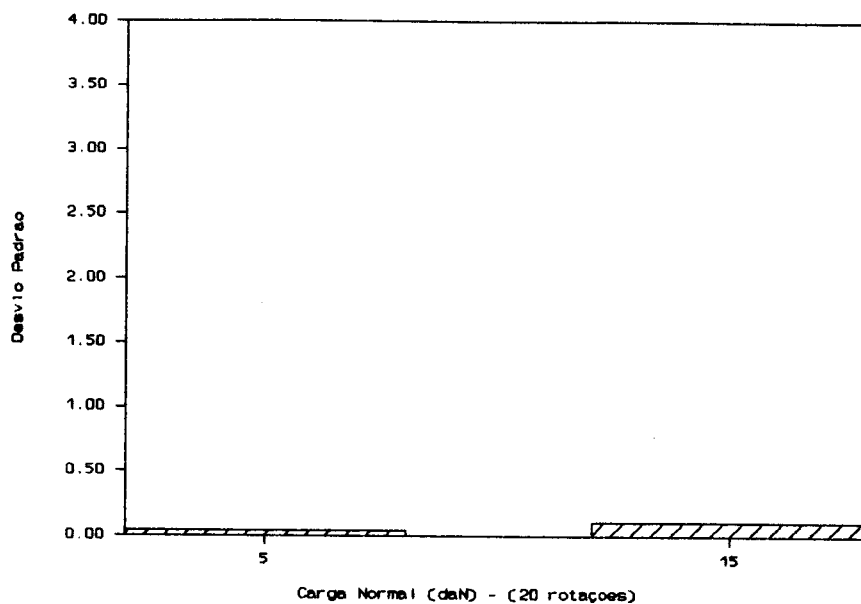


FIGURA 101. Valores médios do desvio padrão do ângulo de atrito da parede, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa) instantâneo (colza).

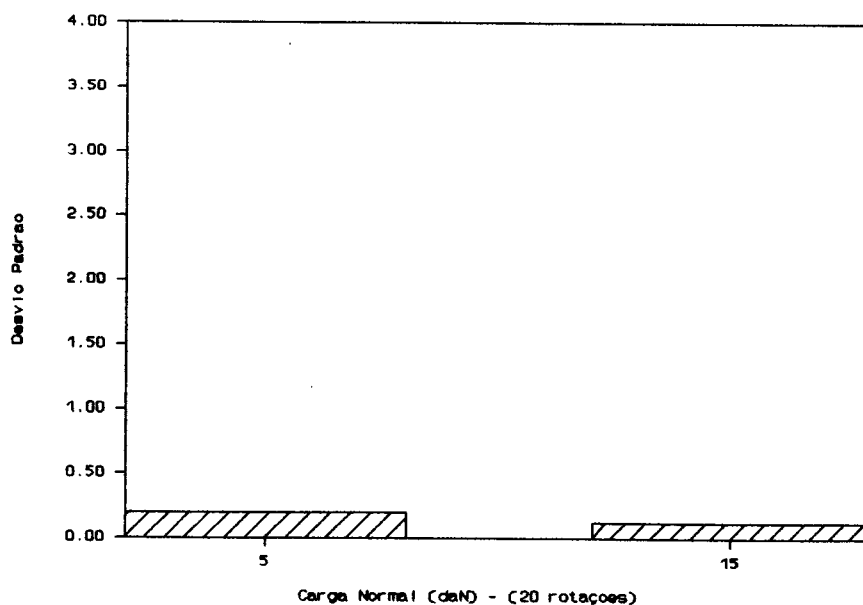


FIGURA 102. Valores médios do desvio padrão do ângulo de atrito da parede, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (rugosa) instantâneo (colza).

5.7.2. Densidade

As Tabelas 41 e 42 apresentam os valores médios da densidade e do desvio padrão, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa e rugosa) dos produtos farinha de trigo e colza, respectivamente.

TABELA 41. Valores médios da densidade e do desvio padrão, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede do produto farinha de trigo (6 repetições).

Número de Rotações	Carga Normal (daN)	Densidade (daN/m ³)		Desvio Padrão	
		Parede		Parede	
		Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa
0	5,00	710,36	695,16	6,81	24,15
20	5,00	721,20	705,29	11,13	16,19
	5,00	727,14	707,60	1,87	20,30
30	12,00	-	748,26	-	2,80
	15,00	754,19	754,19	4,40	7,49
40	5,00	732,63	732,63	4,32	9,91

TABELA 42. Valores médios da densidade e do desvio padrão, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede do produto colza (3 repetições).

Número de Rotações	Carga Normal (daN)	Densidade (daN/m ³)		Desvio Padrão	
		Parede		Parede	
		Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa
20	5,00	650,17	616,61	12,03	23,45
	15,00	674,48	679,40	2,30	22,07

As Figuras 103, 104 (parede lisa), 105 e 106 (parede rugosa) construídas a partir dos dados da tabela 41, apresentam os valores médios da densidade e do desvio padrão, com relação aos níveis de cargas normais em função dos números de rotações utilizados, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa e rugosa) instantâneos para o produto farinha de trigo.

Para as Figuras 103, 104 (parede lisa, 105 e 106 (parede rugosa) verifica-se que:

- os valores médios da densidade (Figuras 103 e 105) das paredes lisa e rugosa, apresentaram-se mínimos para o nível de carga normal 5,0 daN com número de 0 (zero) rotações e máximos para o de 15 daN com 30 rotações, indicando que existe um crescimento dos valores da densidade com relação aos níveis de cargas normais em função dos números de rotações empregados.

- os valores médios dos desvios padrões da densidade (Figuras 104 e 106) apresentaram-se, no geral, menores desvios para a parede lisa e maiores para a rugosa, indicando que a parede lisa apresenta resultados com valores mais homogêneos.

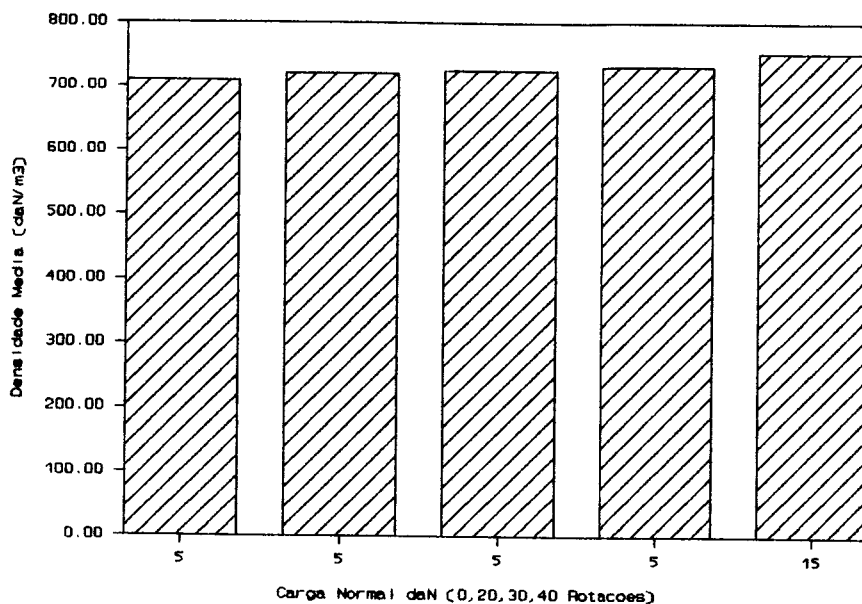


FIGURA 103. Valores médios da densidade, obtidos nos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa) instantâneos (farinha de trigo).

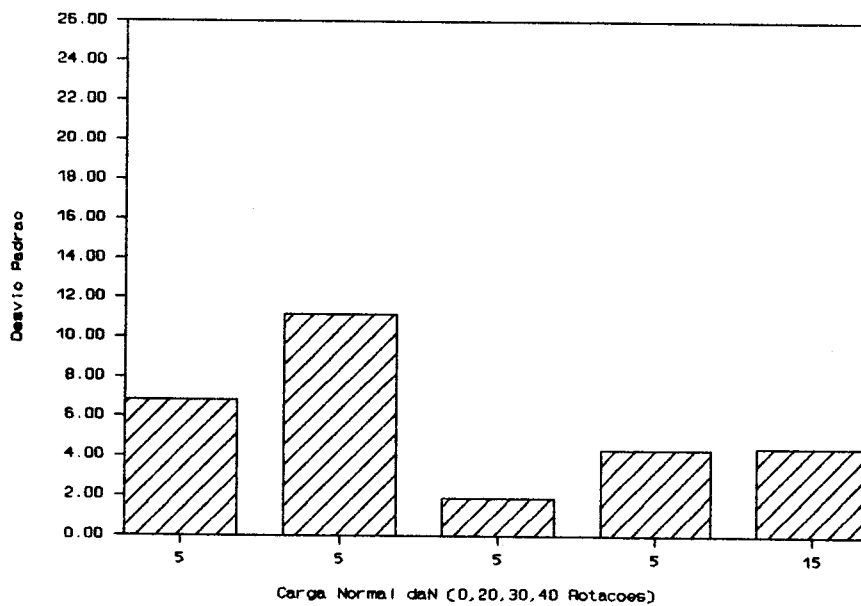


FIGURA 104. Valores médios dos desvios da densidade média, obtidos nos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa) instantâneos (farinha de trigo).

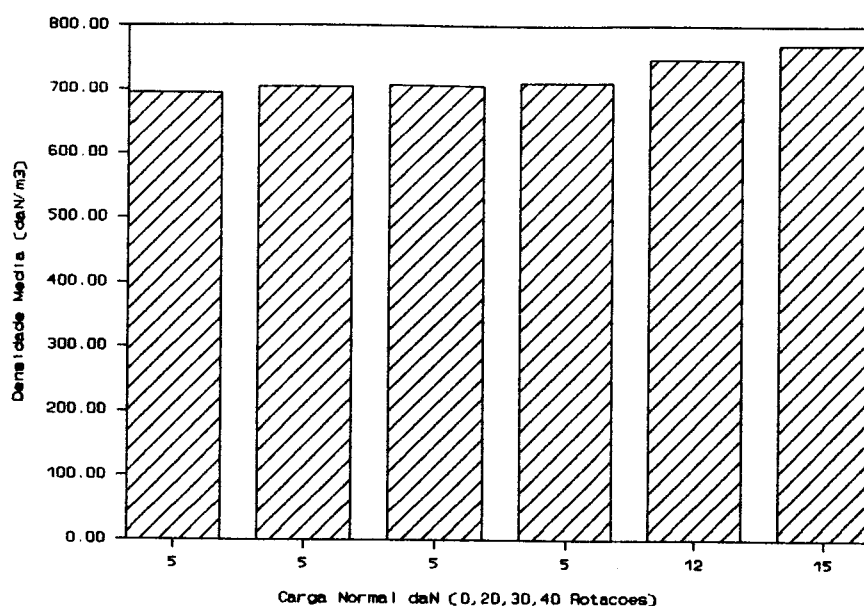


FIGURA 105. Valores médios da densidade, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (rugosa) instantâneos (farinha de trigo).

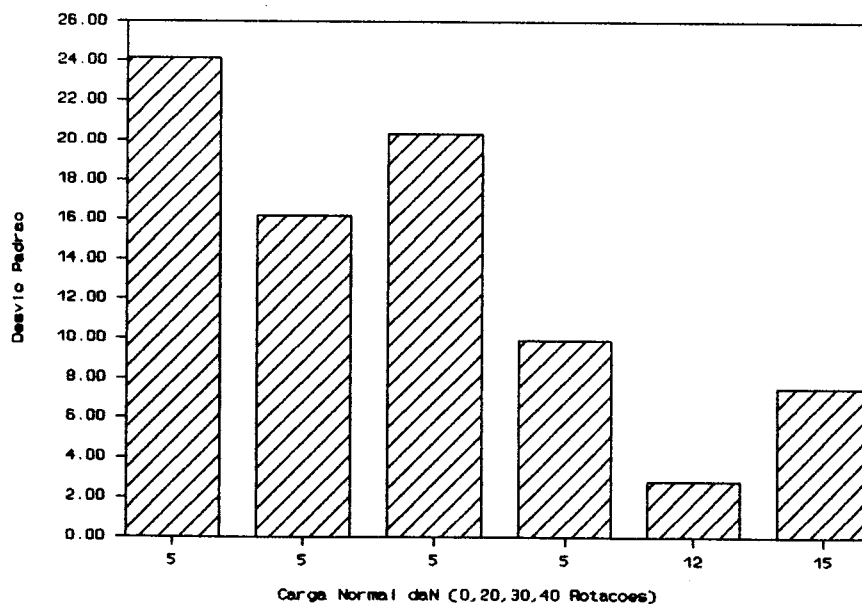


FIGURA 106. Valores médios dos desvios padrões da densidade média, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (rugosa) instantâneos (farinha de trigo).

As Figuras 107, 108 (parede Lisa), 109, 110 (parede rugosa), construídas a partir dos dados da Tabela 42, apresentam os valores médios da densidade e do desvio padrão, com relação aos níveis de cargas normais 5,0 e 15,0 daN em função do número de 20 rotações utilizados, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa e rugosa) instantâneos para o produto colza.

Das Figuras 107, 108 (parede lisa), 109 e 110 observa-se que:

- os valores médios da densidade (Figura 107 e 109) das paredes lisas e rugosas foram máximos para o nível de carga normal 15,0 daN e mínimos para 5,0 daN, apresentando-se a maior diferença entre eles a parede rugosa. Portanto, indicaram um crescimento da densidade média com o aumento do nível de carga;

- para os valores médios dos desvios padrões da densidade, as paredes lisas e rugosas tiveram os máximos para o nível de carga 5,0 daN e os mínimos com o de 15,0 daN, sendo que a parede rugosa apresentou resultados com maiores valores, indicando que seus valores são menos homogêneos do que os da parede lisa.

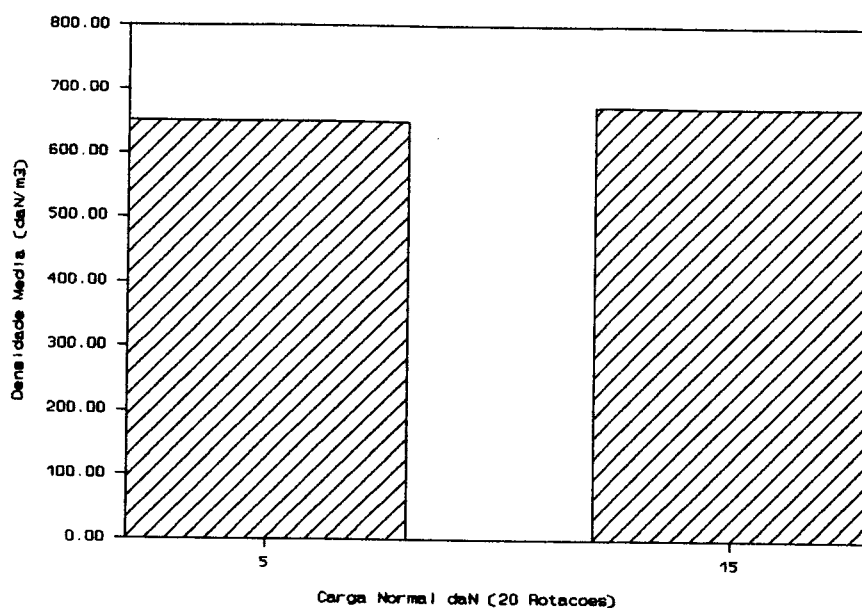


FIGURA 107. Valores médios da densidade, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa) instantâneos (colza).

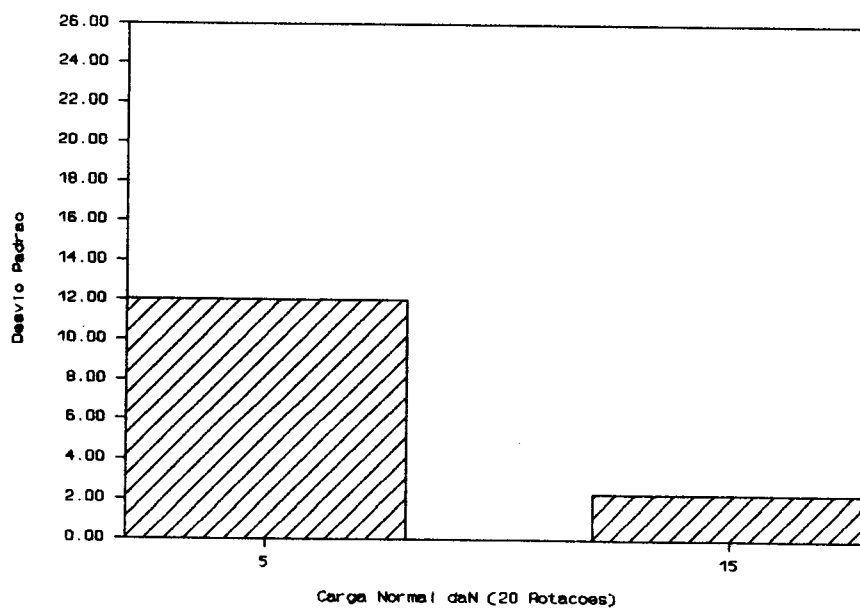


FIGURA 108. Valores médios dos desvios padrões de densidade média, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa) instantâneos (colza).

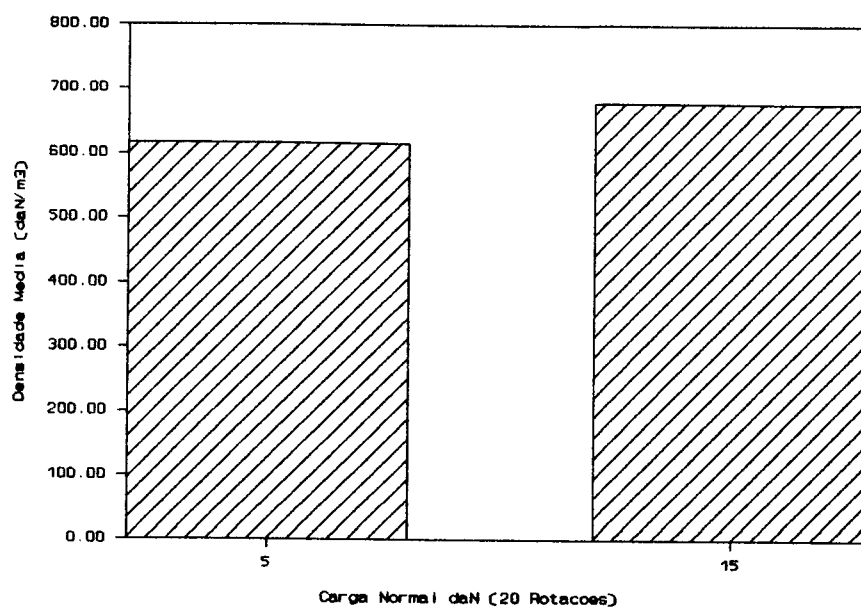


FIGURA 109. Valores médios da densidade, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (rugosa) instantâneos (colza).

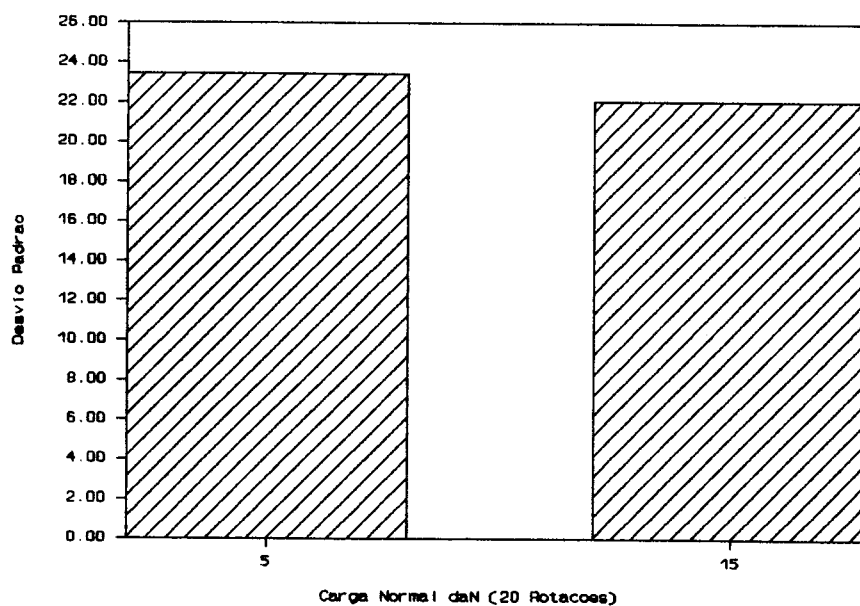


FIGURA 110. Valores médios dos desvios padrões da densidade média, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (rugosa) instantâneos (colza).

5.8. Testes de Cisalhamento de Atrito com a Parede com Tempo de Consolidação

Os ângulos de atrito da parede de tempo, determinados através dos pontos de tensões normais e de cisalhamento (Tabela 43 - farinha de trigo e Tabela 44 - colza), obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com parede com tempo de consolidação, são apresentados na Tabela 45 para o produto farinha de trigo (carga normal 15,0 daN - 30 rotações) e na Tabela 46 para a colza (carga normal 5,0 daN - 20 rotações), em função dos tempos utilizados 0 e 6 horas.

Tabela 43. Valores médios das tensões normais e cisalhamento e de seus desvios padrões, com relação aos níveis de cargas normais (5,0; 10,0; 12,0 e 15,0 daN) em função do número de 30 rotações utilizados, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa e rugosa) com tempo de consolidação do produto farinha de trigo (06 repetições).

Tempo (horas)	Carga Normal (daN)	Tensões kN/m ²				Desvio Padrão - Tensões			
		Normal (σ) Parede		Cisalhamento (τ) Parede		Normal (σ) Parede		Cisalhamento (τ) Parede	
		Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa
0	5,00	7,51	7,51	1,61	2,81	0,00	0,00	0,08	0,10
	10,00	14,74	14,74	2,92	5,04	0,00	0,00	0,09	0,21
	12,00	17,64	17,64	3,35	5,78	0,00	0,00	0,14	0,33
	15,00	-	-	-	-	0,00	0,00	-	-
6	5,00	7,51	7,51	2,38	2,88	0,00	0,00	0,07	0,14
	10,00	14,74	14,74	4,47	5,77	0,00	0,00	0,14	0,15
	12,00	17,64	17,64	4,90	6,78	0,00	0,00	0,14	0,14
	15,00	-	-	-	-	0,00	0,00	-	-

Tabela 44. Valores médios das tensões normais e cisalhamento e de seus desvios padrões, com relação aos níveis de cargas normais (5,0; 10,0; 12,0 e 15,0 daN) em função do número de 30 rotações utilizados, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa e rugosa) com tempo de consolidação com o produto colza (03 repetições).

Tempo (horas)	Carga Normal (daN)	Tensões kN/m^2				Desvio Padrão - Tensões			
		Normal (σ) Parede		Cisalhamento (τ) Parede		Normal (σ) Parede		Cisalhamento (τ) Parede	
		Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa
0	2,00	3,18	3,18	1,33	1,42	0,00	0,00	0,09	0,03
	3,00	4,63	4,63	1,81	1,92	0,00	0,00	0,01	0,04
	4,00	6,07	6,07	2,20	2,39	0,00	0,00	0,03	0,02
	5,00	-	-	-	-	0,00	0,00	-	-
6	2,00	3,18	3,18	1,04	1,25	0,00	0,00	0,03	0,04
	3,00	4,63	4,63	1,44	1,71	0,00	0,00	0,07	0,01
	4,00	6,07	6,07	1,79	2,13	0,00	0,00	0,03	0,02
	5,00	-	-	-	-	0,00	0,00	-	-

As Figuras 111, 112 (parede lisa), 113 e 114 (parede rugosa), construídas a partir dos dados da Tabela 45 do produto farinha de trigo e as Figuras 115 e 116 (parede lisa), 117 e 118 (parede rugosa) da Tabela 46 da colza, apresentam os valores médios do ângulo de atrito da parede de tempo e de seus desvios padrões, em relação aos níveis de cargas normais em função dos números de rotações utilizados, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede com tempo, para os intervalos 0 e 6 horas.

TABELA 45. Valores médios do ângulo de atrito da parede de tempo e de seus desvios padrões obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa e rugosa) com tempo de consolidação do produto farinha de trigo (30 rotações).

Tempo (horas)	Carga Normal (daN)	Ângulo de Atrito da Parede de Tempo (graus)		Desvio Padrão	
		Parede		Parede	
		Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa
0	15,00	10,22	17,38	0,15	0,51
6	15,00	14,44	21,22	0,89	0,00

TABELA 46. Valores médios do ângulo de atrito da parede de tempo e de seus desvios padrões obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa e rugosa) com tempo de consolidação do produto colza (20 rotações).

Tempo (horas)	Carga Normal (daN)	Ângulo de Atrito da Parede de Tempo (graus)		Desvio Padrão	
		Parede		Parede	
		Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa
0	5,00	16,02	18,28	0,04	0,20
6	5,00	14,48	16,95	1,21	0,26

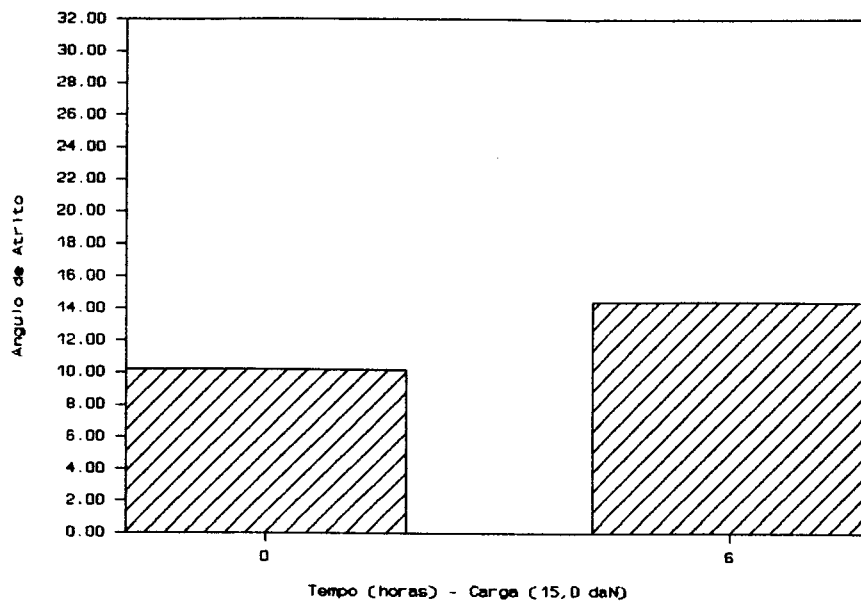


FIGURA 111. Valores médios do ângulo de atrito da parede de tempo, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa) com tempo (farinha de trigo).

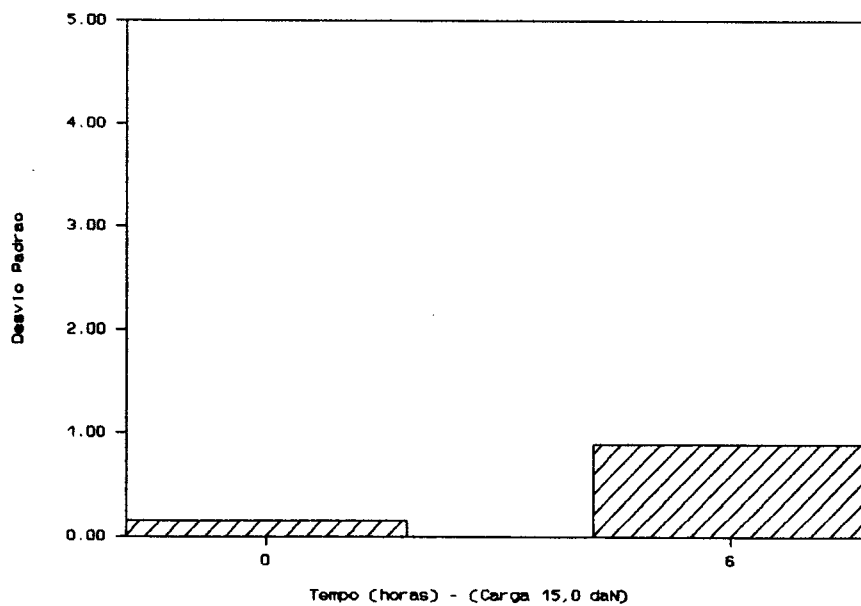


FIGURA 112. Valores médios do desvio padrão do ângulo de atrito da parede de tempo, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com parede (lisa) com tempo (farinha de trigo).

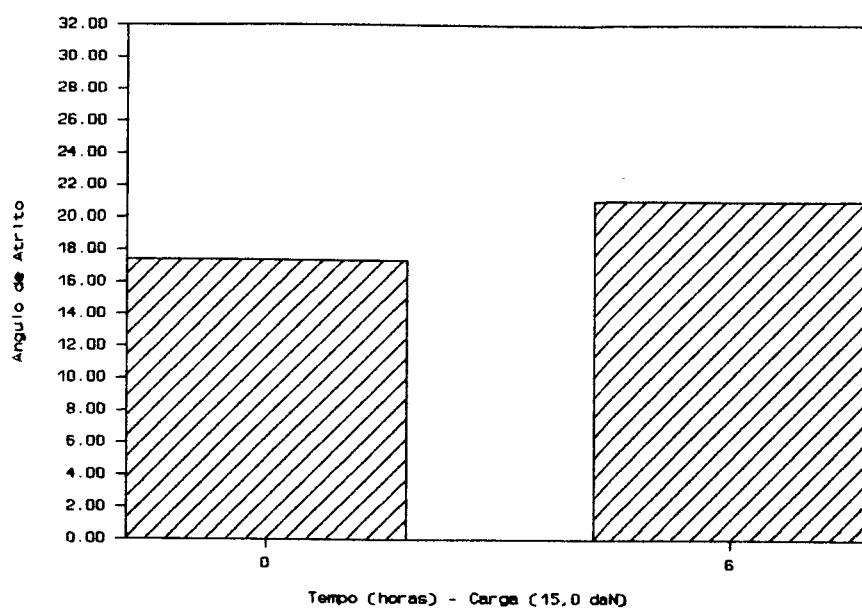


FIGURA 113. Valores médios do ângulo de atrito da parede de tempo, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com parede (rugosa) com tempo (farinha de trigo).

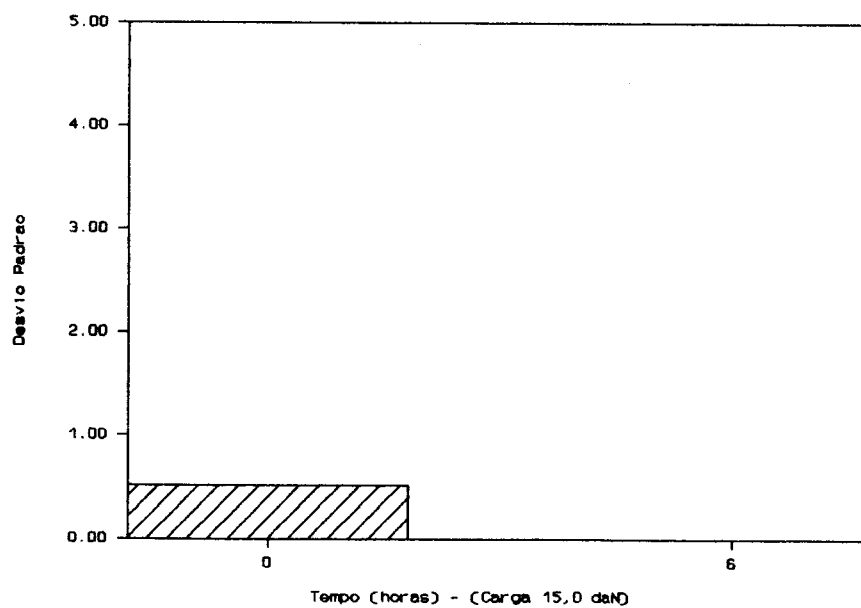


FIGURA 114. Valores médios do desvio padrão do ângulo de atrito da parede de tempo, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (rugosa) com tempo (farinha de trigo).

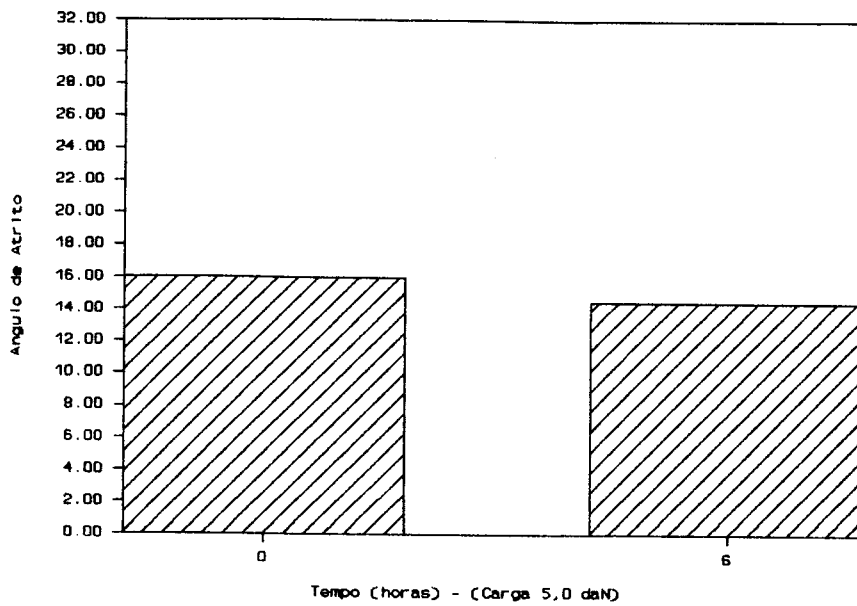


FIGURA 115. Valores médios do ângulo de atrito da parede de tempo, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com a parede (lisa) com tempo (colza).

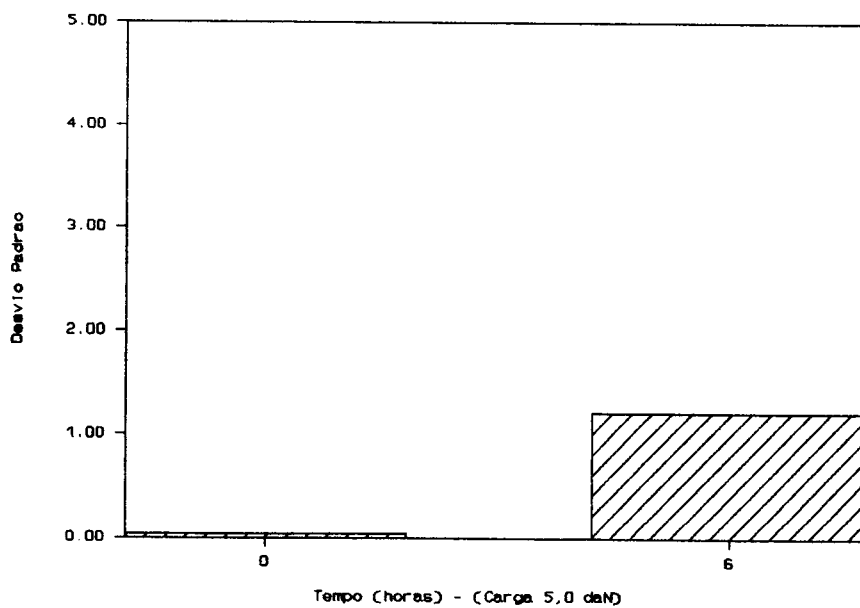


FIGURA 116. Valores médios do desvio padrão do ângulo de atrito da parede de tempo, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito com parede (lisa) com tempo (colza).

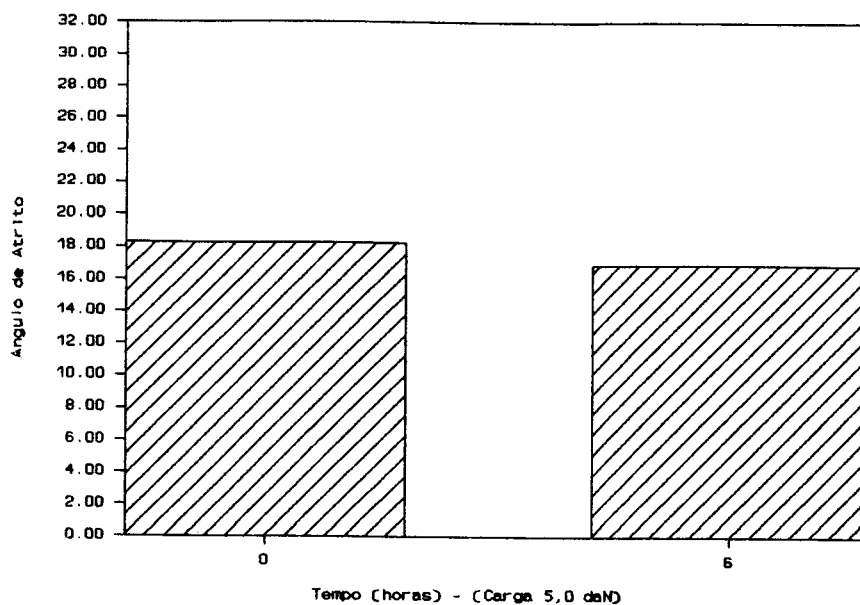


FIGURA 117. Valores médios do ângulo de atrito da parede de tempo, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito da parede (rugosa) com tempo (colza).

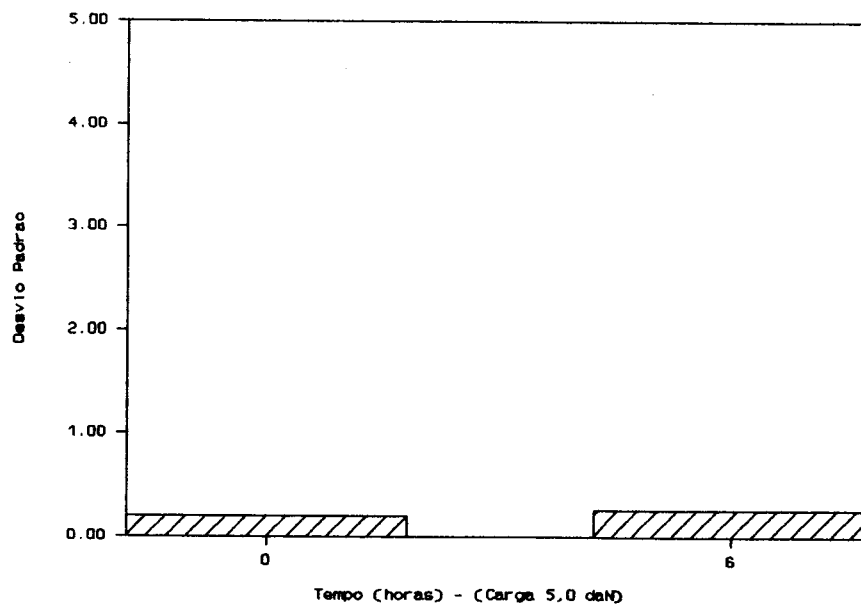


FIGURA 118. Valores médios do desvio padrão do ângulo de atrito da parede de tempo, obtidos dos testes de cisalhamento de atrito da parede (rugosa) com tempo (colza).

Para as Figuras 111, 112 (parede lisa), 113 e 114 (parede rugosa), observa-se que:

- os valores médios do ângulo de atrito da parede de tempo das paredes lisa (111) e rugosa (113) foram maiores para o tempo de consolidação de 6 horas, indicando que esse aumento, possivelmente, tenha ocorrido pela adesão do produto com as paredes;

- os valores médios do desvio padrão do ângulo de atrito da parede (Figuras 112 e 113) foram mínimos e máximos para a parede lisa com o tempo de 0 e 6 horas, respectivamente, e para a parede rugosa ocorreu ao contrário. Portanto, a parede rugosa apresenta resultados com valores mais homogêneos com o tempo de 6 horas e a parede lisa para 0 (zero) horas.

Das Figuras 115, 116 (parede lisa), 117 e 118 (parede rugosa), verifica-se que:

- os valores médios do ângulo de atrito da parede de tempo das paredes lisa (Figura 115) e rugosa (Figura 117) foram menores para o tempo de consolidação 6 horas, indicando que o produto colza com o tempo de consolidação apresentam resultados com valores menores, possivelmente ocorrido pelo aumento da consolidação (densidade);

- os valores médios do desvio padrão com o tempo de 6 horas foram maiores para as paredes lisa e rugosa, com maior intensidade na lisa. Portanto, a parede rugosa para o tempo de 6 horas apresenta resultados com valores mais homogêneos que a lisa, indicando que a influência da

transferência das células à bancada de consolidação e depois para a máquina de ensaio, possivelmente influa nos resultados da parede lisa.

5.9. Número de Repetições dos Testes dos Produtos Farinha de Trigo e Colza

Dos resultados obtidos em cada ensaio que apresentaram valores com menores variações, com a utilização da fórmula do erro para a estimativa da média e da consideração de uma estimativa com confiança de 95% para a média verdadeira, com erro de 5% em torno da média, definiu-se os seguintes números de repetições para a realização de cada teste dos produtos farinha de trigo e colza:

5.9.1. Teste de granulometria

- 2 repetições para os produtos farinha de trigo e colza.

5.9.2. Teste de umidade

- 2 repetições para cada amostra dos produtos farinha de trigo e colza.

5.9.3. Teste de compressibilidade

- Farinha de trigo - 5 repetições
- Colza - 2 repetições

5.9.4. Teste de estado estável

- Farinha de trigo - 5 repetições
- Colza - 2 repetições

5.9.5. Teste de cisalhamento instantâneo

- Farinha de trigo - 9 repetições
- Colza - 2 repetições

5.9.6. Teste de cisalhamento com tempo de consolidação

- Farinha de trigo - 2 repetições
- Colza - 2 repetições

OBS: Com a possibilidade de um comprometimento dos resultados devido a transferência das células à bancada de consolidação e à máquina de ensaio, os testes devem ter no mínimo 3 repetições para os produtos farinha de trigo e colza.

5.9.7. Teste de cisalhamento de atrito com a parede instantâneo

- Farinha de trigo
 - Parede lisa - 3 repetições
 - Parede rugosa - 3 repetições
- Colza
 - Parede lisa - 2 repetições
 - Parede rugosa - 2 repetições

5.9.8. Teste de cisalhamento de atrito com a parede com tempo de consolidação

- Farinha de trigo
 - Parede lisa - 7 repetições
 - Parede rugosa - 2 repetições
- Colza
 - Parede lisa - 11 repetições
 - Parede rugosa - 2 repetições

OBS: Com a possibilidade de um comprometimento dos resultados devido a transferência das células à bancada de consolidação e à máquina de ensaio, os testes devem ter no mínimo 3 repetições para os produtos farinha de trigo e colza.

5.10. Análise Comparativa dos Resultados Obtidos com os Critérios Utilizados nos Trabalhos Citados no Item 4 (Determinação das Propriedades dos Produtos Armazenados)

5.10.1. Testes de granulometria

Para os testes de granulometria, os trabalhos citados no item 4 não adotam critérios que possam servir de base para classificação dos produtos, apenas fazem considerações a respeito do tamanho e distribuição das partículas. A classificação foi feita com base nos critérios adotados por CALIL JR. (1984).

5.10.2. Testes de umidade

Os testes de umidade dos produtos foi realizado pelo método de estufa. Os trabalhos citados no item 4 não adotam critérios para sua realização, apenas fazem considerações com os cuidados que devem ser tomados com relação a preservação da umidade do produto nos testes.

5.10.3. Testes de compressibilidade

Os trabalhos citados no item 4 diretamente não especificam o teste de compressibilidade, mas indiretamente adotam critérios que podem servir de base para sua realização, principalmente com relação aos níveis de cargas normais e do número de rotações empregados.

Dos resultados obtidos nos testes de compressibilidade dos produtos farinha de trigo e colza, pode-se dizer que:

- os critérios adotados para os níveis de cargas normais pelos trabalhos SSTT (1989), JENIKE & JOHANSON (1979) e BMHB (1985) foram condizentes, pois a densidade do produto é afetada diretamente até um certo nível de carga normal;

- com relação ao número de rotações os critérios adotados pelo trabalho SSTT (1989) foram mais adequados, pois os números de rotações necessários para obtenção de resultados com valores mais homogêneos variam de um produto para outro.

5.10.4. Testes de estado estável

Para os testes de estado estável realizados, no geral, os trabalhos citados no item 4 adotam os mesmos procedimentos, dos quais foram tomados como base e dos resultados obtidos verifica-se que:

- com relação aos níveis de cargas normais, para as determinações da consolidação crítica e das tensões de cisalhamento, os critérios adotados pelos trabalhos SSTT (1989), JENIKE & JOHANSON (1979) e BMHB (1985), de uma forma geral, foram adequados pois apresentam valores em função da densidade do produto que podem ser tomados como base;

- para os números de rotações utilizados, os critérios adotados pelo trabalho SSTT (1989) são mais condizentes, pois os resultados de valores mais homogêneos, obtidos para os produtos farinha de trigo e colza, mostraram que os números de rotações não podem ser iguais e variam de um produto para outro.

5.10.5. Testes de cisalhamento instantâneo

No geral, os trabalhos no item 4 adotam os mesmos procedimentos para os testes de cisalhamento instantâneos, variando apenas com relação aos níveis de cargas normais e os números de rotações empregados. Dos resultados obtidos constatou-se que:

- para os níveis de cargas normais utilizados, os critérios adotados pelos trabalhos SSTT (1989), JENIKE &

JOHANSON (1979) e BMHB (1985) se mostraram mais adequados, pois suas considerações, com adoção dos valores dos níveis de cargas normais em função da densidade do produto, representam uma gama de valores que foram tomados como base para realização dos testes;

- com relação aos números de rotações utilizados, os critérios adotados pelo trabalho SSTT (1989) são mais condizentes, pois os resultados obtidos mostraram que para cada produto existe um número de rotações que determina valores mais homogêneos para os testes.

5.10.6. Testes de cisalhamento com tempo de consolidação

Para os testes de cisalhamento com tempo, no geral, os procedimentos adotados nos trabalhos citados no item 4, mostraram-se adequados e dos resultados obtidos nos testes constatou-se que:

- as considerações feitas para os testes de cisalhamento instantâneo (item 5.10.5.), com relação aos níveis de cargas normais e o número de rotações empregados são válidos para os testes de tempo de consolidação;

- com relação aos tempos utilizados, onde os resultados apresentaram valores surpreendentes, os critérios adotados pelos trabalhos TSG 70-140 e JENIKE & JOHANSON (1979) podem ser considerados como base para a realização dos testes.

5.10.7. Testes de cisalhamento de atrito com a parede instantâneo

Para os testes de cisalhamento de atrito com a parede instantâneo, no geral, os trabalhos citados no item 4 adotam os mesmos procedimentos, discrepando apenas com relação aos níveis de cargas normais e o número de rotações empregados. Dos resultados obtidos verifica-se que:

- para os níveis de cargas normais, os critérios adotados pelos trabalhos SSTT (1989), JENIKE & JOHANSON (1979) e BMHB (1985) parecem ser mais adequados e os adotados pelo trabalho TSG 70-140 podem ser tomados como base base a realização dos testes, uma vez que, dependendo do tipo do produto e do material de parede testados, os níveis de cargas normais mostraram que influem diretamente até um certo valor nos resultados.

- com relação aos números de rotações, os critérios adotados pelo trabalho TSG 70-140 podem ser considerados válidos, uma vez que diretamente o número de rotações indicaram que não influem nos resultados, mas indiretamente, para obtenção de resultados com valores mais homogêneos, os critérios adotados pelo trabalho SSTT (1989) são mais adequados, principalmente para as paredes rugosas.

5.10.8. Testes de cisalhamento de atrito com a parede com tempo de consolidação

Os procedimentos adotados nos trabalhos citados

no item 4, no geral, se mostraram adequados aos testes de cisalhamento de atrito com a parede com tempo de consolidação e condizem com as considerações feitas no item 5.10.7. (testes de cisalhamento de atrito com a parede instantâneos), com relação aos níveis de cargas normais e número de rotações empregados. Para o intervalo de tempo utilizado, os resultados mostraram que a sua influência depende do tipo de produto e que os critérios adotados pelos trabalhos TSG 70-140 e JENIKE & JOHANSON (1979) podem ser tomadas como base para realização dos testes.

6. CONCLUSÕES E METODOLOGIA PROPOSTA

6.1. Conclusões

Os trabalhos citados no item 4 (Determinação das Propriedades de Produtos Armazenados), praticamente adotam os mesmos procedimentos para os testes, em geral discrepando-se apenas com os critérios adotados para os níveis de cargas normais, número de rotações e intervalos de tempo de consolidação.

- Os níveis de cargas normais definidos em função da densidade do produto se mostraram mais adequados;

- Os números de rotações mais adequados para as operações de rotações, variam em função do tipo de produto e devem ser adotados em 30 para produto pulverulento e 20 para granular;

- O efeito do tempo de consolidação apresentou

maior influência nos testes de cisalhamento de atrito com a parede com tempo de consolidação;

- A máquina de ensaio para um mesmo teste apresenta resultados com coeficientes de variações diferentes para cada tipo de produto e o número de repetições dos testes devem ser definidos em função das variações dos resultados dos testes preliminares de cada produto.

- Para efeito da determinação das pressões devem ser usados os menores ângulos de atrito com a parede e as maiores densidades obtidas nos ensaios. Para a determinação do tipo de fluxo devem ser usados os maiores ângulos de atrito com a parede e também as maiores densidades obtidas nos ensaios.

6.2. Metodologia Proposta Para a Determinação das Propriedades de Produtos Armazenados com o Equipamento de Cisalhamento por Translação, Conhecido como "Jenike Shear Cell"

Considerando os resultados obtidos nos testes e critérios adotados pelos trabalhos citados no item 4 (Determinação das Propriedades dos Produtos Armazenados), indica-se a adoção dos seguintes procedimentos para cada teste:

6.2.1. Teste de umidade

- Determinação através do método convencional de estufa (com exceção de produtos armazenados voláteis);

- 2 repetições para cada amostra de cada produto

(pulverulentos ou granulares).

6.2.2. Teste de granulometria

Para os produtos pulverulentos e granulares:

- Determinação através do método de peneiramento;
- Classificação com base nos critérios adotados por CALIL JR. (1984);
- 2 repetições para cada amostra de cada produto (pulverulento ou granular).

6.2.3. Teste de compressibilidade

Metodologia descrita no item 4.4.2.3.3. (Testes de Compressibilidade), com os seguintes parâmetros:

- Níveis de cargas normais:
 - produtos pulverulentos: 0,0; 2,0; 4,0; 6,0; 8,0; 10,0; 12,0 e 15,0 daN.
 - produtos granulares: 0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0 e 10 daN.
- Número de rotações:
 - produtos pulverulentos: 30
 - produtos granulares: 20
- Número de repetições:
 - produtos pulverulentos: 5
 - produtos granulares: 2
- Célula de cisalhamento tamanho I (TSG 70-140) para os produtos pulverulentos e granulares.

6.2.4. Teste de estado estável

Metodologia: tomar como base os procedimentos adotados pelos trabalhos citados no item 4, com os seguintes parâmetros:

- Níveis de cargas normais:
 - produtos pulverulentos: 1,5; 3,0; 6,0 e 12 daN
 - produtos granulares: 3,0; 6,0 e 12 daN
- Número de rotações:
 - produtos pulverulentos: 30
 - produtos granulares: 20
- Número de repetições:
 - produtos pulverulentos: 5
 - produtos granulares: 2
- Célula de cisalhamento tamanho I (TSG 70-140)

para os produtos pulverulentos e granulares.

6.2.5. Teste de cisalhamento instantâneo

Metodologia: usar os procedimentos adotados pelos trabalhos citados no item 4, com os seguintes parâmetros:

- Níveis de cargas normais:
 - produtos pulverulentos:
 - Pré-shear: 1,5; 3,0; 6,0 e 12 daN
 - Shear: 0,4; 0,6; 0,8 e 1,0 daN
 - 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 daN
 - 1,5; 2,5; 3,5 e 4,5 daN
 - 3,0; 5,0; 7,0 e 9,0 daN

produtos granulares:

Pré-shear: 3,0; 6,0 e 12,0 daN

Shear: 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 daN

1,5; 2,5; 3,5 e 4,5 daN

3,0; 5,0; 7,0 e 9,0 daN

- Número de rotações

produtos pulverulentos: 30

produtos granulares: 20

- Número de repetições:

produtos pulverulentos: 9

produtos granulares: 2

- Célula de cisalhamento tamanho I (TSG 70-140)

para os produtos pulverulentos e granulares.

6.2.6. Teste de cisalhamento de tempo de consolidação

Para a metodologia e número de rotações, usar os mesmos critérios indicados no item 7.5., com os seguintes parâmetros:

- Níveis de cargas normais:

produto pulverulento: pré-shear - 12,0 daN

Shear - 5,0; 7,0 e 9,0 daN

produto granular: pré-shear - 3,0 daN

Shear - 1,5; 2,0 e 2,5 daN

- Número de repetições:

produto pulverulento: 3

produto granular: 3

- Tempo de consolidação:
 - produto pulverulento: 72 horas
 - produto granular: 0 (zero) horas
- Célula de cisalhamento tamanho I (TSG 70-140)

para os produtos pulverulentos e granulares.

6.2.7. Teste de cisalhamento de atrito com a parede instantâneo

Metodologia: tomar como base os procedimentos adotados pelos trabalhos citados no item 4, com os seguintes parâmetros:

- Níveis de cargas normais:

produtos pulverulentos: parede lisa e rugosa - 0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 daN - 0,0; 0,5; 2,0; 5,0; 10,0 e 15 daN

produtos granulares: paredes lisa e rugosa - 0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 daN - 0,0; 0,5; 2,0; 5,0; 10,0 e 15,0 daN

- Número de rotações;

produto pulverulento: paredes lisa e rugosa -

30

produto granular: paredes lisa e rugosa - 20

- Número de repetições:

produto pulverulento: parede lisa - 3

parede rugosa - 3

produto granular: parede lisa - 2

parede rugosa - 2

- Célula de cisalhamento tamanho I (TSG 70-140)

para os produtos pulverulentos e granulares.

6.2.8. Teste de cisalhamento de atrito com a parede de tempo de consolidação

Metodologia: tomar como base os procedimentos adotados pelos trabalhos citados no item 4, com os seguintes parâmetros:

- Níveis de cargas normais:

produto pulverulento: paredes lisa e rugosa - 0,0; 0,5; 2,0; 5,0; 10,0 e 15,0 daN

produto granular: paredes lisa e rugosa - 0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 daN

- Número de rotações:

produto pulverulento: paredes lisa e rugosa -

30

produto granular: paredes lisa e rugosa - 20

- Número de repetições:

produto pulverulento: parede lisa - 7

parede rugosa - 3

produto granular: parede lisa - 11

parede rugosa - 3

- Tempo de consolidação:

produto pulverulento: paredes lisa e rugosa -

6 horas

produto granular: paredes lisa e rugosa 6
horas

- Célula de cisalhamento tamanho I (TSG 70-140)
para os produtos pulverulentos e granulares.

7. PERSPECTIVAS PARA NOVAS PESQUISAS

Com base na análise teórica e experimental desenvolvida nesta pesquisa, sugere-se:

- análise dos parâmetros com a variação da temperatura e umidade;

- análise das variações dos parâmetros com o aumento do tempo de consolidação da amostra, principalmente para produtos pulverulentos;

- ajuste de outras curvas para representar o comportamento dos lugares geométricos.

- análise dos parâmetros com a variação dos tamanhos das células de cisalhamento.

8. LITERATURA CITADA

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1977). Recommended Practice for Design and Construction of Concrete Bins. Silos and Bunkers for Storing Granular Materials (ACI 313-77). Revised 1983.

AVT. Operating Instructions for the translational shear testes TSG-70-140. AVT Anlagen-und verfahrenstechnik Gm b H, Weigarten-Alemanhã, s.d., 65p. (Manual técnico).

BMHB (1985). British materials handling board. Draf Cade of Practice for the Design of Silos, Bins, Bunkers and Hoppers. Inglaterra, 101p.

CALIL JR.,C. Sobreprecoes en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos. São

Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1984, 184P.
(Apostila).

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

----- . Recomendações para o projeto e construção de silos segundo a ISO. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Santa Maria, 1992. Anais ... 1992. v.I, p.148-158.

CFBC (1983). Canadian Farm Building Code. Associate Committee on the National Building Code. National Research Council of Canada. Ottawa. 25 p.

DIN 1055 (1987). Lastannahmen für Bauten, Blatt 6, Lasten in Silozellen. Alemanha. 12 p.

DZIENDZIEL, A. et al Remarks on the draft of polish silo standard. In: Silos - Forschung und Praxis. Tangung' 88 in Karlsruhe, 1988, Universität Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 1988. 550 p. p. 519-31.

FIP/ISO (1989). Recomemmdation for concrete silo design. Federation Internationale de la précontrainte. Norma

Européia (em execução).

- HAAKER, G.F.J.C.R. Progress in measuring bulk solid properties. In: Chisa Conferation 115. Prague, 1990. 10p.
- JENIKE, A.W. Storage and flow of solids. Bulletin 123. Utah Engineering Experiment Station. University of Utah. Sat Lake City. Utah. Estados Unidos. 1964. 197p.
- JENIKE, A.W. Denting of Circular Bins with Eccentric Drawpoints. Journal of the Struct Division, ASCE, v. 93, n^o ST₁, p. 647-55, February 1967.
- JENIKE, A.W., JOHANSON, J.R. Bin Loads. Journal of the Struct. Division, ASCE, v. 95, n^o ST₁, April 1968.
- JENIKE, A.W., JOHANSON, J.R., CARSON, J.W. Bin Loads in 3 parts. Journal of Engg. for Industry, ASCE, v. 95, n^o 1, p. 1-20, February 1973.
- JENIKE & JOHANSON. Flowfactor tester and consolidating Bench Operating Instructions. Jenike & Johanson, Inc, North Billerica, Massachusetts - USA, 1979, 40p. (Manual Técnico)
- NCSE (1987). Guidelines for the Assessment of Loads on Bulk Solids Containers. National Committee on Structural

Engineering. The Institution of Engineers Australia.
Australia. 59 p.

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

SCHWEDES, J. Evolution of bulk solids technology since 1974.
Separata de Revista bulk Solids Handling, USA, v.3, nº 1,
p.1-5, 1983.

SNBATI (1975). Reglas para Proyecto y Calculo de Silos de
Hormigón. Sindicato Nacional del Hormigón Armado y Técnicas
Industrializadas. França. 47 p.

SSTT. Standard shear testing technique for particulate
solids using the Jenike Shear Cell. The Institution of
Chemical Engineers, George E. Davis Building. Inglaterra,
1989. 40 p. (Manual Técnico).

USHITSKII, M.U, YAN'KOV, V. Yu. Probabilistic characteristics
of the pressure of a granular medium on a silo wall. Societ
Mining Science, v. 24, nº 5, p. 424-8, July 1989.

