



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Dissertação de Mestrado

**PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E DE
FLUXO DE PRODUTOS AGROINDUSTRIAIS**

CARLOS ANDRÉ DA COSTA

**Campina Grande
Paraíba**



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



**PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E DE FLUXO DE PRODUTOS
AGROINDUSTRIAIS**

CARLOS ANDRÉ DA COSTA

**CAMPINA GRANDE - PARAÍBA
FEVEREIRO - 2013**



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



CARLOS ANDRÉ DA COSTA

**PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E DE FLUXO DE PRODUTOS
AGROINDUSTRIAIS**



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

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:

CONSTRUÇÕES RURAIS E AMBIÊNCIA

ORIENTADORES:

Prof. Dr. JOSÉ PINHERO LOPES NETO - UFCG/CTRN/UAEA

**CAMPINA GRANDE - PARAÍBA
FEVEREIRO – 2013**



FICHACATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCCG

C837p Costa, Carlos André da.
Propriedades físicas, mecânicas e de fluxo de produtos agroindustriais /
Carlos André da Costa. – Campina Grande, 2013.
120 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal
de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2013.

"Orientação: Prof. Dr. José Pinheiro Lopes Neto".

Referências.

1. Silos. 2. Compressão. 3. Propriedades Mecânicas. 4. Produtos
Granulares. 5. Produtos Pulverulentos. I. Lopes Neto, José Pinheiro.
II. Título.

CDU 631.24(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO

CARLOS ANDRÉ DA COSTA

**PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E DE FLUXO DE PRODUTOS
AGROINDUSTRIAIS**

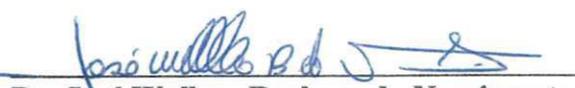
BANCA EXAMINADORA

PARECER



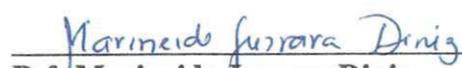
Dr. José Pinheiro Lopes Neto
Orientador (UAEA/CTRN/UFCG)





Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento
Examinador (UAEA/CTRN/UFCG)





Dr. Marineide Jussara Diniz
Examinadora (DCAT/UFERSA)



FEVEREIRO - 2013

DEDICATÓRIA

A Cristiane, pois juntos lutamos para aprender, amadurecer e dar novos passos à frente em nosso caminho, procurando respeitar sempre as mensagens que a vida nos passa e os ensinamentos que recebemos do ser humano;

Aos meus familiares, Vera Lúcia da Rocha Costa, Calos Antônio da Costa, Renata Maria da Costa e Vanda Maria da Rocha, meus sinceros agradecimentos.

In Memória, aos meus avós queridos, Maria Nicolau Ferreira da Rocha, Ana Maria Nicolau da Costa, Antônio Carlos da Costa e Manoel Ferreira da Rocha, saudades eternas!

“Espera no Senhor e sê forte! Fortifique-se
o teu coração e espera no Senhor!

SL 26,14

AGRADECIMENTOS

A Deus onipresente em minha vida;

A meus pais, pelo amor incondicional.

A minha avó Maria e tia Vanda, por me acompanharem em toda a trajetória de minha vida.

A minha irmã, pela amizade e carinho.

A tia Lena e Eugênio, pelo carinho, amizade e ajuda emocional.

Ao meu orientador, Professor Dr. José Pinheiro Lopes Neto, pela orientação, pelo incentivo, pelas sugestões e, principalmente, pela extensa paciência.

Aos Professores José Wallace Barbosa do Nascimento e Dermeval Araújo Furtado, pelas valiosas sugestões.

Ao Professor Adelson Luiz Araújo Tinôco, da Universidade Federal de Viçosa, pelo incentivo à realização deste sonho.

À Universidade Federal de Campina Grande, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização deste trabalho.

A todos os amigos do LaCRA.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao "Chefe" (José Humberto Teixeira Santos), pelo apoio, incentivo e amizade.

A todos aqueles que contribuíram para a realização desta dissertação, agradeço profundamente e dedico o resultado deste trabalho.

BIOGRAFIA

CARLOS ANDRÉ DA COSTA, filho de Vera Lúcia da Rocha Costa e Carlos Antônio da Costa, nasceu em Rio Pomba – MG, em 29 de maio de 1979.

Em 1995 ingressou no curso Técnico em Agropecuária, concluindo-o em 1997, na Escola Agrotécnica Federal de Rio Pomba, hoje conhecida como Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas – Campus Rio Pomba.

Em 2003 ingressou no curso de Engenharia Agrícola e Ambiental, concluindo-o em 2010, na Universidade Federal de Viçosa.

Em março de 2011 iniciou o programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola, na área de Construções Rurais e Ambiente, em nível de mestrado, na Universidade Federal de Campina Grande.

SUMÁRIO

| | |
|--|-------|
| AGRADECIMENTOS | iv |
| BIOGRAFIA..... | vi |
| LISTA DE SÍMBOLOS..... | xi |
| LISTA DE ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS | xii |
| LISTA DE FIGURAS..... | xiii |
| LISTA DE TABELAS | xvi |
| RESUMO..... | xvii |
| ABSTRACT | xviii |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| OBJETIVOS | 3 |
| Objetivo Geral..... | 3 |
| Objetivos Específicos..... | 3 |
| 2. REVISÃO DE BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1. SILO..... | 4 |
| 2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS SILOS | 4 |
| 2.3. PROPRIEDADES DOS PRODUTOS ARMAZENÁVEIS | 6 |
| 2.3.1. Propriedades Físicas..... | 6 |
| 2.3.1.1. Teor de Umidade | 6 |
| 2.3.1.2. Granulometria | 7 |
| 2.3.1.3. Ângulo de Repouso | 8 |
| 2.3.2. Propriedades de Fluxo | 8 |
| 2.3.2.1. Peso Específico Consolidado (γ) | 10 |
| 2.3.2.2. Ângulo de Atrito Interno (ϕ) e Efetivo Ângulo de Atrito Interno (δ) | 10 |
| 2.3.2.3. Ângulo de atrito do Produto com a Parede (ϕ_w)..... | 11 |
| 2.3.2.4. Coesão (C) | 12 |
| 2.3.2.5. Função Fluxo (FF) | 12 |

| | |
|--|----|
| 2.3.2.6. Índice de Fluxo (ff_c)..... | 14 |
| 2.3.2.7. Fator K..... | 15 |
| 2.3.3. Propriedades Mecânicas de Produtos Granulares e Pulverulentos | 18 |
| 2.3.3.1. Coeficiente de Poisson (ν)..... | 19 |
| 2.3.3.2. Módulo de Elasticidade (E)..... | 21 |
| 2.3.3.3. Ângulo de Dilatância (ψ)..... | 22 |
| 2.4. FLUXO..... | 23 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 26 |
| 3.1. Produtos Estudados..... | 26 |
| 3.1.1. Propriedades Físicas..... | 26 |
| 3.1.1.1. Teor de umidade..... | 26 |
| 3.1.1.2. Granulometria..... | 27 |
| 3.1.1.3. Ângulo de Repouso..... | 27 |
| 3.1.2. Propriedades de Fluxo..... | 28 |
| 3.1.3. Propriedades Mecânicas..... | 30 |
| 3.2. CONFECÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS..... | 37 |
| 3.3. INSTRUMENTAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS..... | 39 |
| 3.3.1. Extensômetros..... | 39 |
| 3.3.2. Aferição dos sensores de deslocamento e de força..... | 40 |
| 3.3.3. Programação do sistema de aquisição de dados..... | 42 |
| 3.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL..... | 43 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 46 |
| 4.1. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GRÃOS..... | 46 |
| 4.1.1. Granulometria..... | 46 |
| 4.1.2. Ângulo de repouso..... | 47 |
| 4.2. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PRODUTOS PULVERULENTOS..... | 48 |

| | |
|---|----|
| 4.2.1. Granulometria..... | 48 |
| 4.2.2. Ângulo de repouso | 49 |
| 4.3. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES DE FLUXO DOS GRÃOS | 49 |
| 4.3.1. Peso específico consolidado (γ) | 50 |
| 4.3.2. Ângulo de atrito interno (ϕ), Efetivo ângulo de atrito interno (δ) e Coesão (C)..... | 52 |
| 4.3.3. Índice de Fluxo (ff_c) | 54 |
| 4.3.4. Ângulos de atrito com a parede (ϕ_w) | 55 |
| 4.3.5. Fator K dos grãos..... | 56 |
| 4.4. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES DE FLUXO DOS PRODUTOS PULVERULENTOS..... | 62 |
| 4.4.1. Peso específico consolidado (γ) | 63 |
| 4.4.2. Ângulo de atrito interno (ϕ), Efetivo ângulo de atrito interno (δ) e Coesão (C)..... | 64 |
| 4.4.3. Índice de Fluxo (ff_c) | 65 |
| 4.4.4. Ângulos de atrito com a parede (ϕ_w) | 65 |
| 4.4.5. Fator K dos produtos pulverulentos..... | 66 |
| 4.5. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS GRÃOS | 71 |
| 4.5.1. Arroz..... | 71 |
| 4.5.1.1. Coeficiente de Poisson dos grãos de arroz | 71 |
| 4.5.1.2. Módulo de elasticidade dos grãos de arroz | 75 |
| 4.5.1.3. Ângulo de dilatância dos grãos de arroz..... | 77 |
| 4.5.1.4. Curvas características dos grãos de arroz..... | 78 |
| 4.5.2. Feijão | 81 |
| 4.5.2.1. Coeficiente de Poisson dos grãos de feijão | 81 |
| 4.5.2.2. Módulo de elasticidade dos grãos de feijão | 83 |
| 4.5.2.3. Ângulo de dilatância dos grãos de feijão | 85 |
| 4.5.2.4. Curvas características dos grãos de feijão | 86 |

| | |
|---|-----|
| 4.5.3. Milho Triturado | 88 |
| 4.5.3.1. Coeficiente de Poisson dos grãos de milho triturado | 88 |
| 4.5.3.2. Módulo de elasticidade dos grãos de milho triturado | 90 |
| 4.5.3.3. Ângulo de dilatação dos grãos de milho triturado | 92 |
| 4.5.3.4. Curvas características dos grãos de milho triturado | 94 |
| 4.6. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PRODUTOS PULVERULENTOS..... | 96 |
| 4.6.1. Farinha de Mandioca..... | 97 |
| 4.6.1.1. Coeficiente de Poisson da farinha de mandioca | 97 |
| 4.6.1.2. Módulo de elasticidade dos pós da farinha de mandioca | 99 |
| 4.6.1.3. Ângulo de dilatação da farinha de mandioca | 100 |
| 4.6.1.4. Curvas características da farinha de mandioca | 101 |
| 4.6.2. Farinha de Milho..... | 103 |
| 4.6.2.1. Coeficiente de Poisson da farinha de milho | 103 |
| 4.6.2.2. Módulo de elasticidade da farinha de milho | 105 |
| 4.6.2.3. Ângulo de dilatação da farinha de milho | 107 |
| 4.6.2.4. Curvas características da farinha de milho | 108 |
| 5. CONCLUSÕES | 111 |
| 5.1. Propriedades Físicas | 111 |
| 5.2. Propriedades Fluxo..... | 111 |
| 5.3. Propriedades Mecânicas | 113 |
| 6. SUGESTÕES | 115 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 116 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------|--|
| σ_x | Pressão horizontal |
| σ_y | Pressão vertical |
| ε_y | Deformação vertical |
| E | Módulo de elasticidade calculado |
| E* | Módulo de elasticidade experimental |
| ν^* | Coefficiente de Poisson referente à fase de carregamento |
| ν | Coefficiente de Poisson referente à fase de carregamento |
| ψ | Ângulo de dilatação |
| γ | Peso específico consolidado |
| ϕ | Ângulo de atrito interno |
| δ | Efetivo ângulo de atrito interno |
| ϕ_w | Ângulo de atrito do produto com a parede |
| FF | Função fluxo |
| ff_c | Índice de fluxo |
| ϕ_r | Ângulo de repouso |
| H | Altura total do silo com tremonha |
| D | Diâmetro do corpo do silo |
| d | Diâmetro de partícula |
| H/D | Relação altura/diâmetro |
| δ_d | Variação de comprimento |
| L_0 | Comprimento de referência |
| P | Carga aplicada |
| A_0 | Seção transversal inicial do corpo-de-prova |
| μ | Coefficiente de atrito interno do produto com a parede |
| σ_M | Pressão de consolidação |
| σ_C | Resistência inconfineda |
| YL | Lugar geométrico de deslizamento |
| EYL | Efetivo lugar geométrico de deslizamento |

LISTA DE ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS

| | |
|----------|---|
| ACI | American National Standard Institute |
| ANSI | American National Standard Institute |
| AS | Australian Standard |
| CFBC | Canadian Farm Building Code |
| CONAB | Companhia Nacional de Abastecimento |
| DIN | Deutsche Industrie Norm |
| EUROCODE | European Committee for Standardization |
| ISO | International Standart |
| PrEN | Draft European Committee of Standardization |
| SNBATI | Norma Francesa |
| BMHB | British Materials Handling Board |
| UFCG | Universidade Federal de Campina Grande |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Silo elevado ou aéreo | 5 |
| Figura 2 - Silos semissubterrâneos. a) Vista interna; b) Vista externa | 6 |
| Figura 3 - Esquema ilustrativo do aparelho de cisalhamento direto de Jenike | 9 |
| Figura 4 - Lugares geométricos..... | 11 |
| Figura 5 - Função Fluxo: “fluxo livre” versus “sem fluxo” | 13 |
| Figura 6 - Tração e Compressão de uma barra com raio r e comprimento L | 19 |
| Figura 7 - Efeito da dilatação do produto nas linhas de deslizamento | 22 |
| Figura 8 - Tipos de fluxo. a) Fluxo de Massa. b) Fluxo de Funil | 24 |
| Figura 9 - Determinação gráfica do tipo de fluxo | 25 |
| Figura 10 - Determinação gráfica do tipo de fluxo | 25 |
| Figura 11 - Dispositivo construído para determinação do ângulo de repouso (ϕ_r) | 27 |
| Figura 12 - Célula de cisalhamento direto e aparelho (TSG 70-140) | 28 |
| Figura 13 - Lugares geométricos e ângulos de atrito interno | 29 |
| Figura 14 - Diagrama de carga e descarga | 31 |
| Figura 15 - Equipamento para determinação das propriedades mecânicas..... | 37 |
| Figura 16 - a) Equipamento para determinação das propriedades mecânicas apoiado na base. b) Disposição dos pinos na base | 38 |
| Figura 17 - a) Ensaio de Tração. b) Curvas características do ensaio de tração . | 39 |
| Figura 18 - Posicionamento e fixação do extensômetro na barra de alumínio | 39 |
| Figura 19 - Sistema de aquisição de dados | 40 |
| Figura 20 - Relação métrica/elétrica capturada pelo Spider8 | 41 |
| Figura 21 - Relação mecânica/elétrica capturada pelo Spider8 | 41 |
| Figura 22 - Interface de configuração do Catman 4.5 | 42 |
| Figura 23 - Interface final de programação do Catman 4.5 | 43 |
| Figura 24 - a) Computador conectado ao Spider8 e ao equipamento de determinação de propriedades mecânicas. b) Vista do equipamento de determinação das propriedades mecânicas sobre a base da máquina de ensaio universal..... | 44 |
| Figura 25 - a) Produto nivelado. b) Ensaio em andamento | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 26 - a) Ensaio em andamento. b) Visor da máquina universal de ensaio em destaque..... | 45 |
| Figura 27 - Ângulo de atrito interno com a parede (ϕ_w), de aço rugoso dos produtos granulares | 55 |
| Figura 28 - Fator K para grãos de arroz | 57 |
| Figura 29 - Fator K para grãos de feijão..... | 58 |
| Figura 30 - Fator K para grãos de milho triturado..... | 59 |
| Figura 31 - Fator K para grãos de arroz | 60 |
| Figura 32 - Fator K para grãos de feijão..... | 61 |
| Figura 33 - Fator K para grãos de milho triturado..... | 62 |
| Figura 34 - Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w), de aço rugoso dos produtos..... | 66 |
| Figura 35 - Fator K para farinha de mandioca..... | 67 |
| Figura 36 - Fator K para farinha de milho..... | 68 |
| Figura 37 - Fator K para farinha de mandioca..... | 69 |
| Figura 38 - Fator K para farinha de milho..... | 70 |
| Figura 39 - Coeficiente de Poisson para os grãos de arroz..... | 72 |
| Figura 40 - Módulo de elasticidade para grãos de arroz | 75 |
| Figura 41 - Ângulo de dilatação para grãos de arroz..... | 77 |
| Figura 42 - Curvas características para grãos de arroz a 10% (b.u.)..... | 79 |
| Figura 43 - Curvas características para grãos de arroz a 12% (b.u.)..... | 79 |
| Figura 44 - Curvas características para grãos de arroz a 14% (b.u.)..... | 80 |
| Figura 45 - Coeficiente de Poisson para grãos de feijão | 81 |
| Figura 46 - Módulo de elasticidade para o grão de feijão..... | 84 |
| Figura 47 - Ângulo de dilatação para grãos de feijão | 86 |
| Figura 48 - Curvas características para grãos de feijão a 10% (b.u.)..... | 87 |
| Figura 49 - Curvas características para grãos de feijão a 12% (b.u.)..... | 87 |
| Figura 50 - Curvas características para grãos de feijão a 14% (b.u.)..... | 88 |
| Figura 51 - Coeficiente de Poisson para grãos de milho triturado | 89 |
| Figura 52 - Módulo de elasticidade para grãos de milho triturado..... | 91 |
| Figura 53 - Ângulo de dilatação para grãos de milho triturado | 93 |
| Figura 54 - Curvas características para grãos de milho triturado a 10% (b.u.)..... | 94 |
| Figura 55 - Curvas características para grãos de milho triturado a 12% (b.u.)..... | 94 |
| Figura 56 - Curvas características para grãos de milho triturado a 14% (b.u.)..... | 95 |
| Figura 57 - Coeficiente de Poisson para a farinha de mandioca | 97 |

| | |
|---|-----|
| Figura 58 - Módulo de elasticidade para a farinha de mandioca | 99 |
| Figura 59 - Ângulo de dilatação para a farinha de mandioca | 100 |
| Figura 60 - Curvas características para a farinha de mandioca a 10% (b.u.)..... | 102 |
| Figura 61 - Curvas características para a farinha de mandioca a 12% (b.u.)..... | 102 |
| Figura 62 - Coeficiente de Poisson para a farinha de milho | 103 |
| Figura 63 - Módulo de elasticidade para a farinha de milho | 105 |
| Figura 64 - Ângulo de dilatação para a farinha de milho | 107 |
| Figura 65 - Curvas características para a farinha de milho a 10% (b.u.)..... | 108 |
| Figura 66 - Curvas características para a farinha de milho a 12% (b.u.)..... | 109 |
| Figura 67 - Vista do protótipo sugerido..... | 115 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 - Classificação dos silos quanto à esbeltez | 5 |
| Tabela 2 - Classificação dos produtos quanto à granulometria | 8 |
| Tabela 3 – Valores limites da Função Fluxo proposto por Jenike (1964) | 13 |
| Tabela 4 – Classificação do índice de fluabilidade (ff_c) | 14 |
| Tabela 5 – Formulações para o fator K propostas por autores | 16 |
| Tabela 6 – Formulações para o fator K adotadas pelas normas internacionais ... | 17 |
| Tabela 7 - Níveis de cargas normais utilizados no ensaio de cisalhamento direto | 29 |
| Tabela 8 - Equações propostas para determinação do fator K, pelos autores e normas internacionais | 30 |
| Tabela 9 - Análise granulométrica do arroz | 46 |
| Tabela 10 - Análise granulométrica do feijão | 47 |
| Tabela 11 - Análise granulométrica do milho triturado | 47 |
| Tabela 12 - Resultado da análise granulométrica da farinha de mandioca | 48 |
| Tabela 13 - Resultado da análise granulométrica da farinha de milho | 48 |
| Tabela 14 - Propriedades de fluxo dos produtos granulares | 50 |
| Tabela 15 - Propriedades de fluxo dos produtos pulverulentos | 63 |
| Tabela 16 - Valores médios dos produtos granulares | 96 |
| Tabela 17 - Valores médios dos produtos pulverulentos | 110 |

RESUMO

No cálculo de estruturas de silos vem-se utilizando, ao longo dos tempos, de novas ferramentas e métodos visando à determinação das características dos produtos armazenáveis. A interação produto armazenado e estrutura do silo é de extrema importância para verificação de cargas atuantes no fundo e nas paredes, assim como o fluxo de produto, com vista à elaboração de projetos resistentes a pressões exercidas pelos produtos, tal como a segurança e o custo do empreendimento. Objetivou-se, com a pesquisa, determinar as propriedades físicas, de fluxo e mecânicas de produtos granulares (arroz, feijão e milho triturado), com teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.) e de produtos pulverulentos (farinha de mandioca e de milho), com teores de umidade de 10 e 12% (b.u.), para quatro cargas de compressão (5, 10, 15 e 20 kN). Para determinação de propriedades de fluxo foram utilizadas a metodologia recomendada pela British Materials Handling Board – BMHB e a célula de cisalhamento direto por translação (TSG 70-140) para aquisição dos dados, utilizando-se também utilizado um equipamento para determinação das propriedades mecânicas. Os resultados apontaram que os produtos granulares possuem fluxo livre e nos pulverulentos fluxos coesivos a fácil, o fator K experimental ($K_{exp.}$) apresentou valores abaixo dos calculados por equações propostas por autores e pelas normas internacionais; já o coeficiente de Poisson calculado tanto para o carregamento quanto para o descarregamento, apresentou valores superiores ao experimental e aumento dos valores com o acréscimo do teor de umidade; para o módulo de elasticidade experimental este demonstrou valores superiores ao calculado e ambos aumentaram os valores em relação ao acréscimo do teor de umidade; para o ângulo de dilatância houve redução dos resultados com o aumento do teor de umidade. Todas as curvas produzidas pelos dados médios da tensão vertical (σ_y) versus deformação vertical (ϵ_y), apresentaram, para todos os ensaios, comportamento semelhante ao teórico.

Palavras-chave: silos, compressão, propriedades mecânicas, produtos granulares, produtos pulverulentos

ABSTRACT

In the calculation of structures using silos comes up, over time, new tools and methods aimed at determining the characteristics of storable products. The interaction stored product and the silo structure is of utmost importance to check loads acting on the bottom and walls, as well as product flow, with a view to preparing projects resistant to pressure from products such as security and cost of venture. The objective of the research to determine the physical, mechanical and flow of granular products (rice, beans and ground corn), with moisture contents of 10, 12 and 14% (w.b.) and powders (flour cassava and corn), with moisture contents of 10 and 12% (w.b.) for four compressive loads (5, 10, 15 and 20 kN). To determine flow properties were used methodology recommended by the British Board Materials Handling - BMHB shear cell and by direct translation (TSG 70-140) for data acquisition, using an apparatus also used for the determination of mechanical properties. The results showed that the products have free flowing granular and cohesive powders flows easy, the K-factor experimental ($K_{exp.}$) values were calculated by the following equations proposed by authors and by international standards as Poisson's ratio calculated for both loading and for unloading, showed higher values than the experimental values and increased with increasing moisture content, the modulus of elasticity for this experiment showed higher values than the calculated values and both increased compared to the increase in moisture content, for the angle of dilatancy results decreased with increasing moisture content. All curves produced by the average data of vertical stress (σ_y) versus vertical deformation (ϵ_y) showed, for all tests, similar to the theoretical behavior.

Keywords: silos, compression, mechanical properties, granular products, powdered products

1. INTRODUÇÃO

Silos são células individualizadas, construídas de chapas metálicas, de concreto ou de alvenaria. Geralmente possuem forma cilíndrica, podendo ou não ser equipadas com sistema de aeração. Este tem por objetivo preservar as qualidades físicas, sanitárias e nutricionais dos grãos (Silva, 2008).

No Brasil, a utilização dos silos data de 1900, inicialmente nas fazendas. Atualmente, com a expansão da agricultura e de outros setores da economia, os silos se tornaram estruturas fundamentais em grande e pequena escala devido à economia de espaço físico, mão-de-obra e, sobretudo, a conservação do produto por maior tempo podendo este ter o papel de regulador de preços.

Conforme a CONAB (2012), ao realizar o segundo levantamento de intenção de plantio da safra 2012/2013 a produção de grãos sofrerá um aumento de 6,4 a 9,3% comparado com a safra 2011/2012, sinalizando uma produção entre 176,83 e 181,55 milhões de toneladas de grãos.

Com o desenvolvimento social a demanda por equipamentos mais modernos, seguros e de custo reduzido, tornou-se uma necessidade do setor agrícola e de outros setores que já incluem os silos em seu processo produtivo, como a indústria farmacêutica, química, siderúrgica, mineração e construção civil, dentre outras.

A determinação das características do produto armazenado e da estrutura armazenadora é de fundamental importância para que o carregamento e o descarregamento sejam eficientes e seguros.

Inúmeros problemas podem ocorrer nos silos durante o processo de carga ou descarga: segregação das partículas, compactação dos grãos, formação de arco, rompimento da estrutura e acidentes com vítimas fatais.

A interação produto armazenado e estrutura do silo é de extrema seriedade para que se verifiquem as cargas nas paredes do silo assim como o fluxo do produto, visando a um projeto resistente às pressões exercidas pelo produto ensilado.

Para obtenção desses índices numéricos que sirvam de base para elaboração de projetos mais eficientes e viáveis, dentre outros, é que se faz necessário o estudo das propriedades físicas, de fluxo e mecânicas dos grãos e pulverulentos.

Ante este desafio se espera encontrar índices que viabilizem os projetistas a melhorar os designs de silos, bem como os produtores de grãos e pós, seu maior conhecimento em estruturas armazenáveis.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

- ✓ Determinar as propriedades físicas, de fluxo e mecânicas dos grãos de arroz, feijão e milho triturado e de materiais pulverulentos sendo eles farinha de mandioca e de milho.

Objetivos Específicos

- ✓ Caracterizar fisicamente produtos agroindustriais granulares e pulverulentos.
- ✓ Determinar as propriedades de fluxo de produtos armazenáveis granulares e pulverulentos e prever seu comportamento durante o descarregamento.
- ✓ Determinar experimentalmente o fator k (razão entre a pressão horizontal / pressão vertical) através do equipamento de determinação das propriedades mecânicas e comparar os valores com os obtidos pelas equações de Aoki (1978), Frazer (1948), Hartmann (1966) e Jaky (1948) e pelas normas internacionais ACI 313 (1991), AS 3774 (1996), DIN 1055 (2005) e EUROCODE 1 (2006).
- ✓ Determinar o coeficiente de Poisson, Módulo de elasticidade e Ângulo de dilatação dos produtos agroindustriais granulares e pulverulentos.

2. REVISÃO DE BIBLIOGRÁFICA

2.1. SILO

Os silos são estruturas construídas de vários materiais com a finalidade de armazenar produtos granulares e pulverulentos visando à qualidade final do produto, os quais são possuidores ou não de mecanismos de carga e descarga, assim como sistemas de aeração.

Silva (2008) define silo como células individuais construídas para salvaguardar a qualidade do produto durante longos períodos de armazenagem construídas de diversos materiais, como chapa de metal, concreto, alvenaria e madeira, entre outros, podendo ou não apresentar sistema de ventilação.

Com o nome genérico de silos, Freitas (2001), chama, as estruturas destinadas ao armazenamento de produtos granulares ou pulverulentos, os quais podem, possui dispositivos (mecânicos ou pneumáticos) para efetuar a descarga e/ou, preferencialmente, capazes de serem esvaziados por gravidade.

2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS SILOS

Várias são as classificações dos silos quanto à geometria, ao material empregado na estrutura e também em relação ao solo.

Quanto à sua geometria, há grandes divergências entre autores e normas; esta classificação pode dividir-se em silos esbeltos com relação $H/D \geq 1,5$; silos baixos, com relação $H/D < 1,5$ e silos horizontais que apresentam as dimensões da base maior que a altura. Em geral, silos são classificados, com relação $H/D \leq 1,5$, como sendo baixo e, caso contrário, altos.

Calil Junior & Cheung (2007), em seu trabalho, apresentam uma relação de normas quanto à classificação dos silos em relação à esbeltez (Tabela 1).

Tabela 1 - Classificação dos silos quanto à esbeltez

| Norma | Classificação | | |
|--------------------------------------|--|-------------------------|---|
| | Baixos | Mediamente Esbelto | Esbeltos |
| ACI-313:1991 | | | |
| ANSI/ASAE EP433:2001 | $H/D < 2,0$ | – | $H/D > 2,0$ |
| AS3774:1996 | $H/D < 1,0$ | $1,0 \leq H/D \leq 3,0$ | $H/D > 3,0$ |
| PrEN 1991-4:2003 DIN 1055-03:2005 | $0,4 \leq H/D \leq 1,0$ | $1,0 \leq H/D \leq 2,0$ | $H/D \geq 2,0$ |
| CFBC:1983 | $H/D \leq 1,0$ ou $H/D < \tan^2 (\Phi/2 + \pi/4)$ | – | $H/D > 1,0$ e $H/D \geq \tan^2 (\Phi/2 + \pi/4)$ |

H - altura total do silo com a tremonha; D - diâmetro do corpo do silo; – - não possui classificação

Fonte: Adaptado de Calil Junior & Cheung (2007)

Outra classificação se refere ao material empregado na construção que é bem diversos, como madeira, alvenaria, concreto e chapas metálicas (lisa, ondulada, trapezoidais) entre outros.

Quanto ao nível de referência do solo para esta classificação Calil Junior & Cheung (2007) relatam que se divide em três grupos, sendo: silo elevado ou aéreo (Figura 1); silo subterrâneo e silos semissubterrâneos (Figura 2a e 2b).

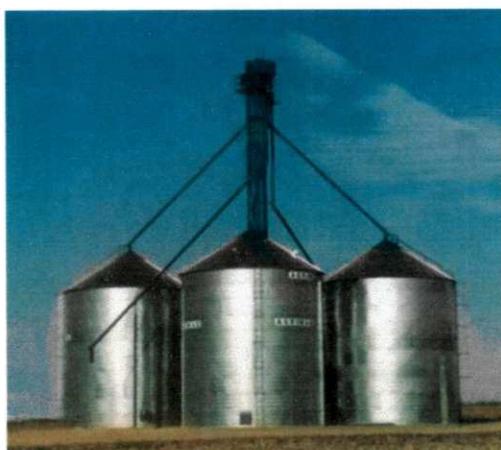


Figura 1 - Silo elevado ou aéreo

Fonte:

<http://www.noticiasrurales.com.uy/general/internacionales/el-agro-argentino-con-un-panorama-incierto/attachment/silos-5/>

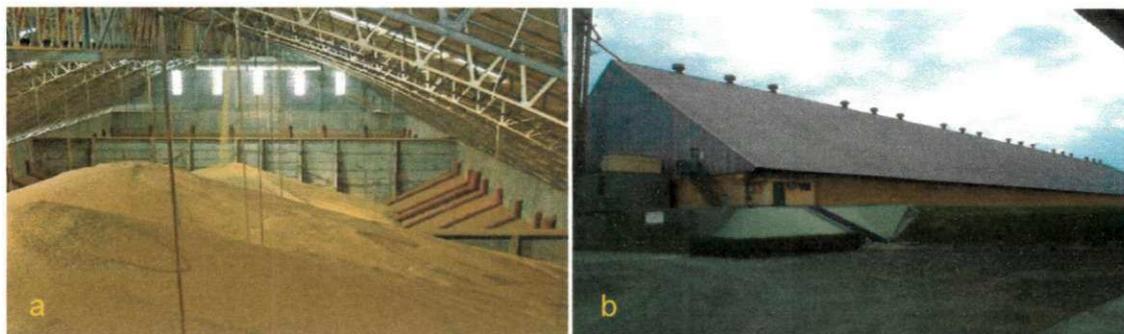


Figura 2 - Silos semissubterrâneos. a) Vista interna; b) Vista externa

Fonte: a) <http://www.paranacentro.com.br/noticia.php?idInsercao=780>;

b) <http://www.coacavo.com.br/SiloVotuLocal.aspx>.

2.3. PROPRIEDADES DOS PRODUTOS ARMAZENÁVEIS

2.3.1. Propriedades Físicas

2.3.1.1. Teor de Umidade

O conceito teor de umidade para Silva (2008) se resume na quantidade relativa de água presente no grão o qual, por sua vez e em sua constituição, é composto por substâncias sólidas e água retida sob várias formas. Diversas operações de pós-colheita realizadas com o produto como, por exemplo, secagem, armazenamento, transporte, tal como as propriedades de físicas, de fluxo e mecânicas, são influenciados por esse fator, assim como a qualidade final do produto.

Em geral o teor de umidade é expresso em porcentagem, em base úmida (b.u.) ou em base seca (b.s.).

Mohsenin (1970) apud Silva et al. (2011) em seu trabalho destaca que a maioria das propriedades físicas dos grãos se altera de acordo com a variação do seu teor de umidade afirmação que também foi observada nos experimentos (Magalhães et al., 2000; Ribeiro et al. 2007).

Silva & Correia (2008) confirmam, com base em suas pesquisas, que as propriedades físicas, como o ângulo de repouso, são altamente influenciadas, conseqüentemente, pelo teor de umidade. Esta afirmação é corroborada por Silva et al. (2011) que, trabalhando com grãos de café, observaram que não só apenas o ângulo de repouso foi influenciado mas também o ângulo de atrito interno, a força de coesão e o ângulo de atrito interno com a parede, influenciando, conseqüentemente no fluxo de descarga do silo.

Para as propriedades mecânicas Maki et al. (1994) apud Ribeiro et al. (2007), constataram diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da umidade.

Como o exposto acima, o teor de umidade assume grande valor de destaque nas pesquisas pois esta informação é determinante para os cálculos de conservação, gastos energéticos, desenvolvimento de equipamentos e estruturas de armazenagem.

2.3.1.2. Granulometria

O estudo granulométrico dos produtos armazenáveis torna-se indispensável a várias atividades no armazenamento, como ao cálculo da potência de equipamentos para aeração, equipamentos transportadores e, principalmente, predizendo o tipo de fluxo que o produto apresenta.

Produtos granulares são, via de regra, não-coesivos, de fluxo livre e geralmente sem apresentar coesão; já os produtos pulverulentos são coesivos podendo, assim, ter seu fluxo não-livre devido à presença de pó (Calil Junior & Cheung, 2007).

Na Tabela 2 apresenta-se uma classificação para os produtos em relação ao diâmetro das partículas para cinco classes distintas (AS 3774, 1996).

Tabela 2 - Classificação dos produtos quanto à granulometria

| Diâmetro das Partículas (mm) | Classificação |
|-----------------------------------|---------------|
| $d < 0,15$ | Pó |
| $d < 3$ | Grão Fino |
| $d < 12$ | Grão Grosso |
| $d > 12$ | Granular |
| Fibras, Fibras Alongadas e Outros | Irregular |

Fonte: Adaptado de AS 3774 (1996) e Garbazza (2011)

2.3.1.3. Ângulo de Repouso

Segundo Magalhães et al. (2000), o coeficiente de fricção entre materiais granulares é igual à tangente do ângulo de fricção interno do material denominado ângulo de repouso.

Sendo um indicativo de fluidez para os produtos agroindústrias, o ângulo de repouso é definido resumidamente como o ângulo máximo formado pelos grãos (produto) com o plano horizontal (Laskowski, et al., 2005). Este sofre influência de outros parâmetros físicos como, por exemplo, teor de umidade, tamanho dos grãos, forma e constituição externa do grão. Sua importância faz-se necessária para determinação da capacidade estática de silos, capacidade de correias transportadoras, dimensionamento de moegas, dutos e rampas de descarga (Silva, 2008).

2.3.2. Propriedades de Fluxo

Conforme Lopes Neto (2009a) apud Lopes Neto & Nascimento (2013), dentre as principais dificuldades enfrentadas pelas indústrias que trabalham com grãos e pulverulentos, destaca-se a formação de arcos coesivos que impedem, parcial ou completamente, a descarga, que está intrinsecamente relacionada às geometrias dos silos e tremonhas bem como as propriedades físicas e de fluxo dos produtos sólidos e condições ambientais como: pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa.

Juliano et al. (2006) afirmam que as propriedades de fluxo são responsáveis por determinar o tipo de fluxo em silos, tremonhas e em transportadores, sendo possível maximizar operações como descargas, transilagem, dosagem de empacotamento, além de problemas quanto ao tipo de fluxo e obstrução de descarga.

De acordo com Calil Junior (1990) apud Batista (2009) o fluxo de um sólido diminui com o aumento do teor de umidade, que alcança um valor máximo entre 80 a 90% de saturação visto que, acima deste teor de umidade, o sólido adquire propriedades viscosas e, desta forma, os testes de cisalhamento não podem ser aplicados.

Por meio do aparelho de Jenike (Figura 3), pode-se fazer a determinação das propriedades de fluxo de produtos coesivos ou não e para o desenvolvimento dos critérios de projetos necessita-se do conhecimento do lugar geométrico da tensão de cisalhamento versus a tensão normal para o produto deslizando sobre si mesmo como sobre a parede do silo. Com este equipamento pode ser determinada a tensão à qual o produto estará sujeito durante o armazenamento, como as condições de fluxo previstas para ocorrer no silo e determinar os seguintes parâmetros: peso específico consolidado (γ); ângulo de atrito interno (ϕ); efetivo ângulo de atrito interno (δ) e ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w), (Batista, 2009).

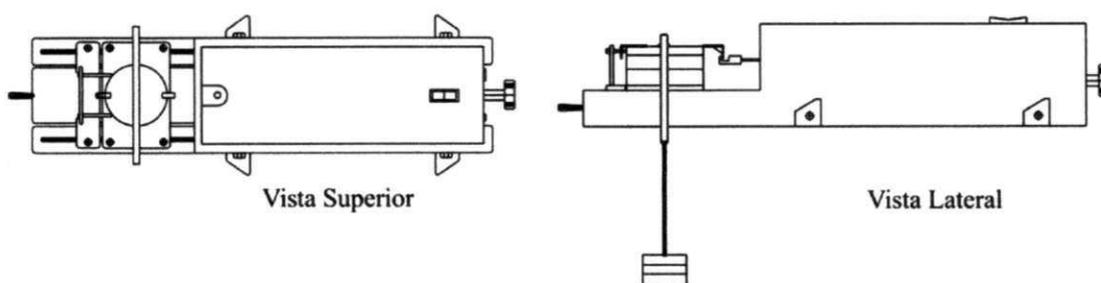


Figura 3 - Esquema ilustrativo do aparelho de cisalhamento direto de Jenike

Fonte: Adaptado de Lopes Neto & Nascimento (2013)

2.3.2.1. Peso Específico Consolidado (γ)

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

Segundo Calil Junior (1990) apud Batista (2009) o peso específico consolidado (γ) é um parâmetro utilizado na determinação do fluxo e das pressões em silos, não havendo relação linear direta entre fluxo e densidade; entretanto, os produtos pulverulentos de baixo peso específico fluem com menor resistência sofrendo menor compactação na região da tremonha; por outro lado, há uma inércia maior em repouso e alta resistência ao ar; contudo, o produto pulverulento com alta densidade sofre maior compactação na região da tremonha e baixa inércia em repouso.

2.3.2.2. Ângulo de Atrito Interno (ϕ) e Efetivo Ângulo de Atrito Interno (δ)

Para Freire (2004) em vários produtos, após certa tensão de consolidação, ocorre uma força intensa entre suas partículas.

Com a construção de círculos de Mohr, plotam-se retas que tangenciam todos os círculos chamadas lugar geométrico de deslizamento do produto (YL). O ângulo de inclinação dessa reta para produtos de fluxo livre passa pela origem, e é então chamado ângulo de atrito interno do produto (ϕ) mas, não sendo o produto de fluxo livre, a reta construída na forma descrita não passa pela origem. Neste caso, a ordenada na qual essa reta corta o eixo vertical (eixo das ordenadas) é denominada coesão (C). O ângulo de inclinação dessa reta é, ainda, o ângulo de atrito interno mas a reta que passa pela origem e tangencia o círculo de Mohr definido pela maior e menor tensão principal é denominada, então, lugar geométrico efetivo de deslizamento (EYL) e o respectivo ângulo de inclinação é denominado efetivo ângulo de atrito interno (δ), como é observado na Figura 4 (Batista, 2009).

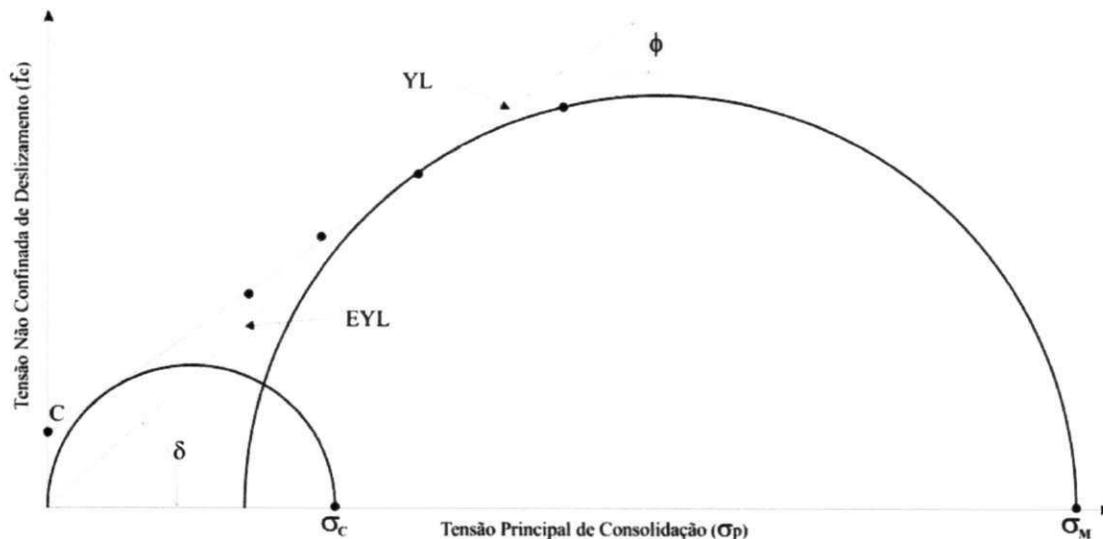


Figura 4 - Lugares geométricos

Fonte: Adaptado de Lopes Neto (2009)

Freire (2004) apud Nascimento (2006), desde que as tangentes às curvas do lugar geométrico de deslizamento (YL) ao Círculo de Mohr, tendam a ser incertas, o efetivo ângulo de atrito interno é, na prática, sempre construído com uma linha entre a origem e o ponto final do lugar geométrico efetivo de deslizamento (EYL).

Calil Junior (1990) apud Silva et al. (2011), aponta para a necessidade de conhecimento das propriedades físicas dos produtos armazenados que exercem papel relevante no comportamento de pressões e fluxo.

2.3.2.3. Ângulo de atrito do Produto com a Parede (ϕ_w)

Benink (1989) apud Freire (2004), afirma que o atrito entre o produto e a parede do silo ocorre quando este desliza ao longo da parede. A relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal à parede formará uma reta que definirá o lugar geométrico de deslizamento com a parede (WYL). Sua inclinação será o ângulo de atrito do produto com o material da parede do silo.

Calil Junior (1990) apud Freire (2004) assegura que a determinação deste ângulo é importante tanto para o fluxo como para o cálculo das pressões e deve ser determinada para todas as condições desfavoráveis (umidade, corrosão,

abrasão, revestimento da superfície). Em algumas situações, dependendo do carregamento aplicado ao produto, o ângulo de atrito do produto com a parede aumenta; daí, é presente a necessidade a determinação do mesmo em função do tempo para se tiver valores confiáveis.

Para determinação das características geométricas de silos, tremonhas e dimensões do orifício de descarga, deve-se direcionar especial atenção ao ângulo de atrito com a parede que representa o esforço de adesão entre o produto armazenado e a superfície do material da parede.

2.3.2.4. Coesão (C)

Garbazza (2011) a coesão (C) varia com o grau de consolidação da amostra sendo encontrada quando se estende o lugar geométrico de deslizamento (YL) para interceptar o eixo das ordenadas (tensão não confinada de deslizamento) descrevendo, assim, a coesão de um estado não consolidado; deste modo, a coesão é a tensão de cisalhamento sob a tensão normal nula.

Calil Junior e Cheung (2007), afirmam que um dos fatores que contribuem para a coesão é a presença de pó, que é definida pelo ensaio granulométrico.

2.3.2.5. Função Fluxo (FF)

Nascimento (2008) apud Garbazza (2011) relata que o fluxo ocorre quando as pressões são tais que o cisalhamento se dá sem destruir a isotropia do produto armazenado. Durante o fluxo o peso específico do produto é uma função das pressões. Quando as pressões são constantes o produto cisalha sob densidade constante mas se as pressões aumentam o produto compacta e o peso específico também aumenta porém, quando as pressões diminuem, o produto expande, o peso específico diminui e o fluxo pode prosseguir indefinidamente.

Esta propriedade determina o comportamento reológico do material armazenado para diferentes pressões de compactação sendo, assim, considerada medida de fluidez (Amorós et al., 2002).

Com vista à determinação da função fluxo (FF) é feita uma relação direta entre a pressão de consolidação (σ_M) e a resistência inconfina (σ_c), como expressam a Equação 1 e a Figura 5.

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

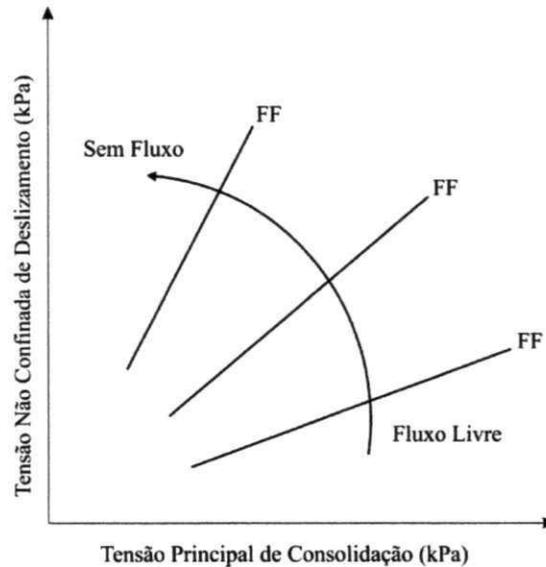


Figura 5 - Função Fluxo: “fluxo livre” versus “sem fluxo”

Fonte: Lopes Neto et al. (2007)

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

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

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

Fonte: Adaptado de Garbazza (2011)

A inclinação da reta define o grau de escoabilidade do produto (Lopes Neto et al. 2009). Cada produto armazenado tem suas próprias funções fluxo, instantânea e temporal e, por sua vez, os produtos sem coesão, de fluxo livre, não possuem função fluxo (Garbazza, 2011).

2.3.2.6. Índice de Fluxo (ff_c)

Jenike (1964) apud Lopes Neto & Nascimento (2013) constatou, ao observar o comportamento da escoabilidade dos produtos armazenáveis, que esta é inversamente proporcional à inclinação da reta que a função fluxo forma com a horizontal. Esta observação foi chamada, pelo autor, de índice de fluabilidade (ff_c), em que este pode variar de uma ausência total de fluxo até outra caracterizada como fluxo livre, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação do índice de fluabilidade (ff_c)

| Tipos de fluxo | Índice de fluabilidade (ff_c) |
|----------------|-----------------------------------|
| Sem fluxo | $ff_c < 1$ |
| Muito coesivo | $1 < ff_c < 2$ |
| Coesivo | $2 < ff_c < 4$ |
| Fácil | $4 < ff_c < 10$ |
| Livre | $ff_c > 10$ |

Fonte: Adaptado de Lopez Neto & Nascimento (2013)

Prescott (2000) apud Garbazza (2011) assegura que a fluidez do produto armazenado não pode ser expressa por um valor único ou um índice. A fluidez é o resultado da combinação das propriedades físicas com os equipamentos usados para manipulação, armazenagem ou processamento do produto.

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

O índice de fluxo está associado a uma diminuição da densidade e a uma redução da tensão de cisalhamento correspondente (Hezel, 2007).

2.3.2.7. Fator K

Madrona (2008) assegura que a determinação da relação entre pressões horizontais e verticais no produto armazenado, o fator K, é um dos maiores entraves em projetos de silos; seu valor influencia significativamente no regime de pressões em um silo. Em vários trabalhos de pesquisa e normas são sugeridas diferentes recomendações para calcular o valor deste parâmetro; na maioria dos casos o cálculo de K é realizado conhecendo-se apenas ângulo de atrito interno do produto, havendo casos em que o ângulo de atrito com a parede também é utilizado.

Nascimento & Calil Junior (2009) relatam ser Janssen (1885) um dos pioneiros na pesquisa das pressões em silos, pois apresentou formulações para o cálculo das pressões horizontais, verticais e de atrito, exercidos pelo produto armazenado e declarou, ainda, que a relação entre as pressões, K, deveria ser medida para cada produto armazenado.

Normas internacionais que tratam do assunto sobre ações em silos procuram adotar tais formulações, para explicar este evento. Algumas trazem uma lista de produtos e seus respectivos valores para o fator K, assim como, também, sugerem equações matemáticas e valores dos parâmetros envolvidos podendo ser obtidos experimentalmente (Nascimento & Calil Junior, 2009).

Na Tabela 5 podem ser observadas, resumidamente, algumas formulações para o fator K e seus respectivos autores.

Tabela 5 – Formulações para o fator K propostas por autores

| Autor | Equação proposta |
|-----------------|---|
| Aoki (1978) | $k = \left[1 + 2 \operatorname{tg}^2 \delta + \frac{4\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}{3\mu^2} \left\{ \operatorname{tg}^3 \delta - (\operatorname{tg}^2 \delta - \mu^2)^{\frac{3}{2}} \right\} \right]^{-1}$ $\mu = \tan \phi_w$ |
| Frazer (1948) | $k = \frac{1}{\frac{1 + \sin^2 \delta}{\cos^2 \delta} + \frac{2 \sin \delta}{\cos^2 \delta} \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \phi_w}{\operatorname{tg}^2 \delta}}}$ |
| Hartmann (1966) | $k = \frac{1 - \sin^2 \delta}{1 + \sin^2 \delta}$ |
| Jaky (1948) | $k = \frac{(1 - \sin \delta) \left(1 + \frac{2}{3} \sin \delta \right)}{1 + \sin \delta}$ |
| Rankine-Koenen | $k = \frac{1 - \sin \delta}{1 + \sin \delta}$ |
| Walker | $k = \frac{1 + (\sin^2 \delta) - 2\sqrt{\sin^2 \delta - \mu^2 \cos^2 \delta}}{4\mu^2 + \cos^2 \delta}$ $\mu = \tan \phi_w$ |

Legenda: K: fator K; δ : efetivo ângulo de atrito interno; μ : coeficiente de atrito com a parede; ϕ_w : ângulo de atrito com a parede

Fonte: Adaptado de Lopes Neto (2009)

Observam-se, na Tabela 6, algumas equações adotadas pelas principais normas internacionais.

Tabela 6 – Formulações para o fator K adotadas pelas normas internacionais

| Norma | Equação adotada |
|-------------------|---|
| ACI 313 (1991) | $k = \frac{1 - \sin \delta}{1 + \sin \delta}$ |
| AS 3774 (1996) | $k = \frac{1 + (\sin^2 \delta) - 2\sqrt{\sin^2 \delta - \mu^2 \cos^2 \delta}}{4\mu^2 + \cos^2 \delta} \leq 0,35$ $\mu = \tan \phi_w$ |
| DIN 1055 (2005) | $k = 1,2(1 - \sin \delta)$ |
| EUROCODE 1 (2006) | $k = 1,1(1 - \sin \delta)$ |
| EP 433 (2000) | Constante igual a 0,5 |
| ISO 11697 (1997) | $k = 1,1(1 - \sin \delta)$ |
| SNIBATI (1975) | $k = \frac{1-m \sin \delta}{1+m \sin \delta} \cos^2 \phi_w, \quad m = \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \phi_w}{\tan \delta}\right)^2}$ |

Legenda: K: fator K; δ : efetivo ângulo de atrito interno; μ : coeficiente de atrito com a parede; ϕ_w : ângulo de atrito com a parede

Fonte: Adaptado de Lopes Neto (2009)

Ayuga (1995) *apud* Lopes Neto (2009) afirma, para determinação do parâmetro K, que sejam levadas em conta três formulações, variando-as em relação ao tipo de parede, relatadas a seguir:

- Paredes absolutamente lisas ($\phi_w = 0$), adotar fórmula de Rankine-Koenen;
- Paredes muito rugosas ($\phi_w = \phi$), adotar a fórmula de Hartmann (1966);
- Casos intermediários, adotar a formulação proposta pela norma francesa SNBATI (1975).

Garbaza (2011) aponta que no estudo das pressões três fatores de interesse devem ser destacados: o primeiro é o econômico, pois várias instalações foram e estão sendo construídas em todo o país e no mundo e requerem projetos mais elaborados; o segundo é o científico, em que, os silos são estruturas complexas nas quais se combinam comportamentos estruturais de

diferentes materiais e, mesmo após uma série de estudos, ainda existem grandes lacunas de conhecimento que estimulam vários pesquisadores a desenvolver trabalhos no campo das pressões; o terceiro é o social, visto que, vários problemas ocorreram em razão do não conhecimento do comportamento estrutural das estruturas de armazenamento.

2.3.3. Propriedades Mecânicas de Produtos Granulares e Pulverulentos

Madrona (2008), afirma que o produto armazenado possui um comportamento comprimido porque durante o armazenamento, ele está sujeito a altas tensões e baixas deformações de modo que se comporta aproximadamente como um sólido. Por outro lado, durante o fluxo, atuam baixas tensões e altas deformações, com o produto se comportando aproximadamente como um fluido.

Ramírez et al. (2009), asseguram que dados sobre as variáveis mecânicas, tais como o coeficiente de Poisson (sendo este coeficiente um dos parâmetros mais importantes para determinação das pressões dos silos), o módulo de elasticidade e o ângulo de dilatação de sólidos a granel, ainda são insuficientes, visto que os métodos clássicos não os desenvolvem em sua complexidade, mas afirmam que para se obter resultados viáveis e confiáveis pode-se utilizar os métodos numéricos.

Stasiak et al. (2012), apontam para uma escala crescente de operações industriais enquanto a concepção de processos confiáveis e os equipamentos eficientes exigem informações mais precisas sobre as propriedades do produto físico e como alterá-las em diferentes condições de processamento. Haja, ainda, uma forte necessidade para determinar a compressão e o comportamento do fluxo de pós coesivos.

De acordo com Madrona (2008), um modelo de comportamento entre tensões e deformações apresentadas pelo produto é complexo e deve considerar algumas características como:

- ✓ Deformação permanente: o produto não recupera sua configuração depois de cessada a aplicação de carregamentos;

- ✓ Dependência do processo carga-descarga: não existe uma relação única entre tensões e deformações, ou seja, dado um valor da deformação em um instante, só é possível determinar o estado de tensão correspondente conhecendo-se a evolução do processo carga-descarga;
- ✓ Dependência da taxa de aplicação da carga: o produto pode adquirir resistência com o aumento da taxa de aplicação da carga;
- ✓ Não linearidade elástica: relação não linear entre tensões e deformações;
- ✓ Comportamento plástico: o produto se plastifica a partir de certo estado de tensão, ou seja, com baixos incrementos de tensão o produto se deforma excessivamente;
- ✓ Assimetria do comportamento de tração-compressão: as forças de coesão interna conferem baixa resistência à tração nos produtos granulares que, muitas vezes, pode ser considerada desprezível.

2.3.3.1. Coeficiente de Poisson (ν)

Admitindo-se que um corpo sofra tração após ser submetido a uma força axial, não só se alonga como também sofre contração lateral; já ao ser aplicada uma força de compressão, o oposto ocorre, sofrendo um achatamento longitudinalmente e seus lados se expandem lateralmente (Hibbeler, 2004). Pela Figura 6 são ilustrados os dois casos supracitados.

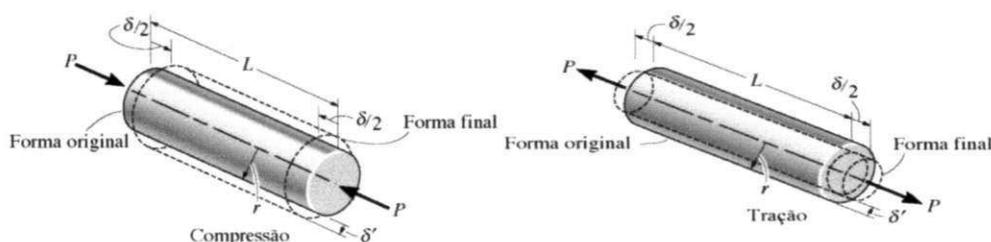


Figura 6 - Tração e Compressão de uma barra com raio r e comprimento L

Fonte: Adaptado de Hibbeler (2004)

Hibbeler (2004) relata que duas equações norteiam a deformação, a primeira aplicada na direção longitudinal ou axial (Equação 2) e a segunda na direção lateral ou radial (Equação 3).

$$\varepsilon_{long} = \frac{\delta}{L} \quad \text{Eq. 2}$$

$$\varepsilon_{lat} = \frac{\delta'}{L} \quad \text{Eq. 3}$$

em que:

ε_{long} → Deformação longitudinal, $L.L^{-1}$;

ε_{lat} → Deformação longitudinal, $L.L^{-1}$;

δ → Comprimento longitudinal final, L;

δ' → Comprimento radial final, L;

L → Comprimento inicial, L.

Hibbeler (2004) ainda explica que o coeficiente de Poisson representa a relação entre as deformações lateral e longitudinal aplicada somente na faixa de elasticidade (Equação 4).

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{lat}}{\varepsilon_{long}} \quad \text{Eq. 4}$$

A razão entre essas deformações é uma constante adimensional e seu valor se encontra entre o zero e meio ($0 \leq \nu \leq 0,5$).

O sinal negativo é utilizado pois o alongamento longitudinal (deformação positiva) provoca contração lateral (deformação negativa) e vice-versa.

Cheung (2007) relata que o Poisson é um caso particular da distribuição binomial e se origina de uma sequência de Bernoulli, que ocorre ao longo de um contínuo (tempo ou espaço) com intervalos (tempo ou espaço) tendendo a zero. O número de tentativas de Bernoulli tendendo a infinito e a probabilidade de

ocorrência do evento de interesse em cada tentativa tendendo a zero, originam um processo chamado Poisson.

Rotter (2001) apud Madrona (2008) mostra que este coeficiente está relacionado ao fator K no interior do produto no estado estático (K_0), ou seja, sem deformações, segundo a Equação 5.

$$\nu = \frac{k_0}{1 + k_0} \quad \text{Eq. (5)}$$

O módulo de deformidade depende do coeficiente de Poisson, que pode ser considerado uma constante para cada material (Couto et al., 2002; Resende et al. 2007).

2.3.3.2. Módulo de Elasticidade (E)

De acordo com Ribeiro et al. (2007), a partir da curva de “força-deformação”, obtida a partir do teste de compressão, pode-se obter parâmetros que caracterizam a resposta do material quando submetido a uma carga. Para material não-biológico de forma geométrica regular, ao dividir a força pela área da seção transversal e a deformação pelo comprimento inicial do espécime, obtém-se a curva “tensão-deformação específica”. Para grande número de materiais o comportamento inicial da curva “tensão-deformação específica” é linear (elástico), sendo a inclinação da reta denominada módulo de elasticidade ou de Young, único para cada material.

Conforme Madrona (2008) enquanto o produto se encontrar armazenado em repouso no interior do silo a consideração de material elástico é adequada.

Martínez (2002) apud Palma (2005) tem desenvolvido trabalhos abordando os processos de carregamento e descarga em silos. No estado de carregamento ele tem empregado o comportamento constitutivo elástico enquanto na descarga, o critério de Mohr-Coulomb.

Entretanto, na relação entre tensões e deformações dos materiais estruturais se destacam duas teorias: a teoria da elasticidade e a teoria da plasticidade; para Madrona (2008), esses dois comportamentos são idealizados e

não representam satisfatoriamente o comportamento real da maioria dos materiais existentes na natureza que, em geral, podem ser representados pela combinação desses dois em que os produtos granulares, por exemplo, podem ser considerados elásticos até certo valor de tensão a partir do qual se tornam perfeitamente plásticos.

2.3.3.3. Ângulo de Dilatância (ψ)

O ângulo de dilatância (ψ) corresponde ao ângulo formado entre a linha de deslizamento da amostra e a direção real do deslizamento (Figura 7). Ele está relacionado à dilatância volumétrica do produto quando ele é submetido ao cisalhamento. Vários autores acreditam que esta dilatância volumétrica é um dos fatores que causam o aumento das pressões na condição de descarga do silo (Madrona, 2008).

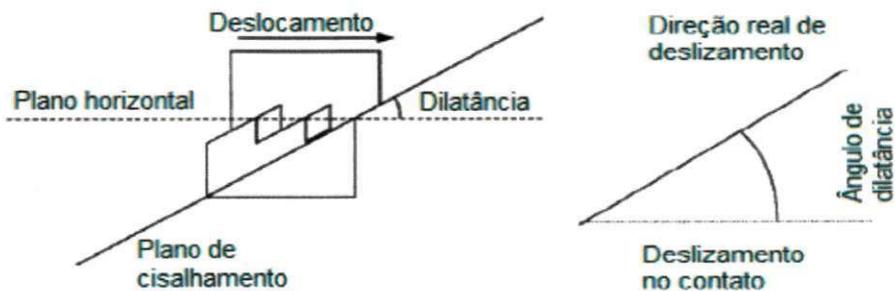


Figura 7 - Efeito da dilatância do produto nas linhas de deslizamento

Fonte: Adaptado de Madrona (2008)

Para Ramírez et al. (2009) o ângulo de dilatância influencia as distribuições de pressão sobre a parede do silo de armazenamento, durante o enchimento (como uma consequência da consolidação) e da descarga; os autores ainda salientam para a importância do ângulo de dilatância na distribuição das pressões durante a descarga do silo e que este valor pode ser obtido em ensaios de cisalhamento direto ou triaxial.

Como um parâmetro importante ao estudo do critério de elastro-plástico de Drucker-Prager é também utilizado nas definições das regras de fluxo que determinam a direção da plasticidade, quando o ângulo de dilatância é não só

igual ao ângulo de atrito interno a regra do fluxo é associada à plasticidade ocorrendo, na normal da superfície, uma expansão volumétrica do material plástico. Se este for menor que o ângulo de atrito interno haverá uma expansão volumétrica menor e se o ângulo de dilatação for igual a zero, não haverá expansão volumétrica (Guaita et al., 2003).

2.4. FLUXO

O fluxo em silos pode ocorrer de duas formas: por fluxo de funil em que, durante a descarga, o material tende a formar um canal até o orifício de descarga, com zonas estáticas, e o fluxo de massa, no qual o produto fluirá e não existirão zonas estáticas (Nóbrega & Nascimento, 2005).

Calil Junior & Cheung (2007), destacam que o tipo de fluxo caracteriza o descarregamento do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de produto sem movimento e se o silo pode ser descarregado completamente; além desses, a distribuição das pressões nas paredes do silo e na fundação, a integridade da estrutura e o custo de implantação do projeto.

Quanto ao fluxo de massa, Amorós et al. (2002), afirmam ser o mais vantajoso visto que elimina a possibilidade de obstruções do fluxo, minimiza os efeitos associados à segregação por tamanhos, renovação do material (já sem zonas mortas); o fluxo é uniforme e fácil de controlar, a densidade durante a descarga é praticamente constante e toda a capacidade de armazenamento é aproveitada (Figura 8a).

Conforme Amorós et al. (2002), uma das poucas vantagens no fluxo de funil é o menor desgaste nas paredes do silo já que o atrito entre a parede e o produto durante o descarregamento, é desprezível; as pressões as quais a parede é submetida, são menores, levando a redução do custo de construção (Figura 8b).

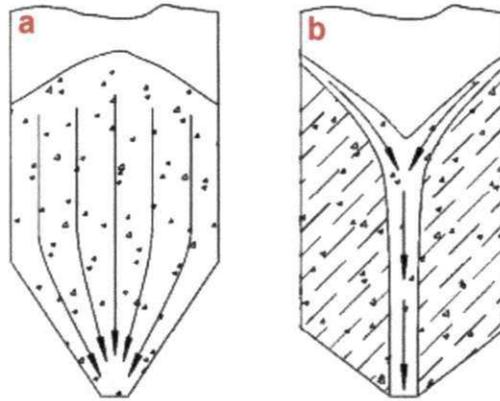


Figura 8 - Tipos de fluxo. a) Fluxo de Massa. b) Fluxo de Funil

Fonte: Adaptado de Lopes Neto (2009)

Cannavacciuolo et al. (2009) apud Lopez Neto & Nascimento (2013) afirmam que produtos pulverulentos e com alta coesão podem apresentar dificuldade de fluxo devido à influência das interações dinâmicas entre gás-sólido e sólido-sólido.

Já Nóbrega & Nascimento (2005) relatam que em vários trabalhos com a análise do fluxo se apontam características que podem provocar problemas no escoamento do produto, como o arco coesivo e o efeito tubo, sendo um dos principais motivadores a escala granulométrica, pois o produto pulverulento pode ser coesivo.

Segundo a norma australiana AS 3774 (1996) e a norma europeia PrEN 1991-4 (2003) que utilizam ábacos para predizer o tipo de fluxo mediante as seguintes informações: função do ângulo ou do coeficiente de atrito com a parede, da inclinação das paredes da tremonha e do tipo de tremonha (cônicas ou em cunha concêntricas). As Figuras 9 e 10 ilustram a apresentação gráfica da escolha do tipo de fluxo preconizado pelas normas AS 3774 (1996) e PrEN 1991-4 (2003).

Para a escolha do ângulo de inclinação da tremonha, Calil Junior & Cheung (2007) recomendam que seja sempre diminuído de 3° (três graus) para obter um padrão de fluxo seguro devido às incertezas embutidas no processo.

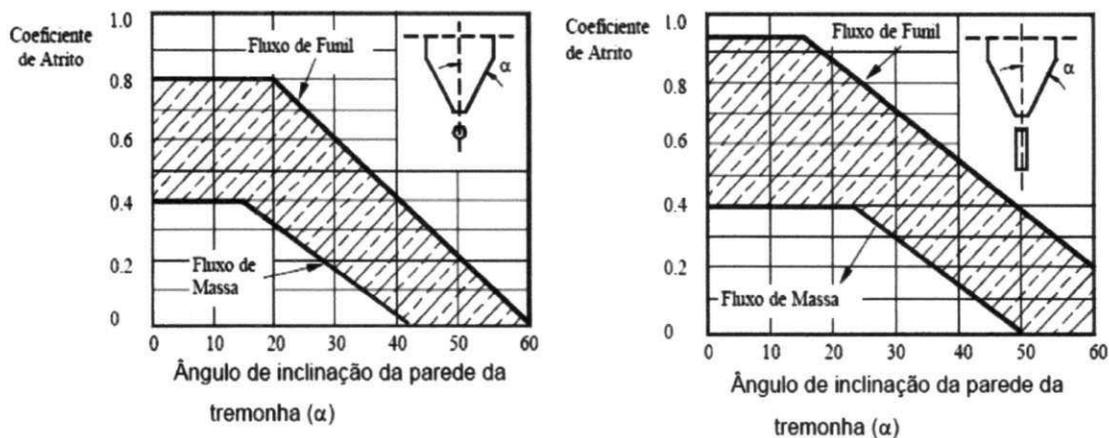


Figura 9 - Determinação gráfica do tipo de fluxo

Fonte: Adaptado de AS 3774:1996

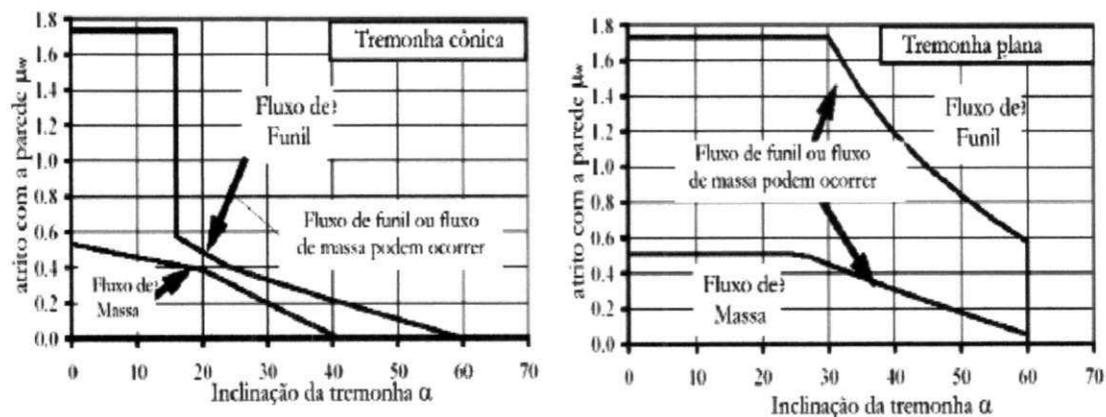


Figura 10 - Determinação gráfica do tipo de fluxo

Fonte: Adaptado de PrEN 1991-4:2003

3. MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no período de julho a setembro do ano de 2012, nos laboratórios: Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LaCRA) e Laboratório de Materiais Recicláveis e Resíduos Sólidos, ambos pertencentes à Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, Paraíba - PB, Brasil.

3.1. Produtos Estudados

Foram determinadas as propriedades físicas, de fluxo e mecânicas dos grãos de arroz (*Oryza sativa* L., parbolizado, polido, classe longo fino, tipo 1), feijão (*Phaseolus vulgaris* L., grupo 1, feijão comum, classe cores, tipo 1) e de milho triturado (*Zea mays*) com teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.). Também se determinaram as propriedades físicas, de fluxo e mecânicas dos produtos pulverulentos da farinha de mandioca (*Manihot esculenta* L., grupo seca, acidez baixa, classe fina, tipo 1) e farinha de milho (*Zea mays* L.) com teores de umidade de 10 e 12% (b.u.).

Para compressão dos produtos foram utilizadas cargas de compressão de 5, 10, 15 e 20 kN, como referência.

3.1.1. Propriedades Físicas

As propriedades físicas determinadas nesta dissertação foram: teor de umidade, granulometria e ângulo de repouso.

3.1.1.1. Teor de umidade

O teor de umidade do produto foi medido pelo método padrão de estufa, com circulação forçada de ar a 105 ± 3 °C, durante 24 h, conforme descrito em Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009).

3.1.1.2. Granulometria

A granulometria foi determinada por um agitador mecânico de peneiras. Utilizaram-se 500 gramas de produto com uma frequência do aparelho de 10 Hz, durante 5 minutos e peneiras de padrão ABNT (4,76; 4,00; 2,36; 1,40; 1,00; 0,59; 0,297 mm e número 63) em ordem decrescente de malha; ao final foi pesado o material que permaneceu no interior de cada peneira determinando-se, assim, sua percentagem.

3.1.1.3. Ângulo de Repouso

O ângulo de repouso foi determinado por meio de um dispositivo composto por um funil a uma altura fixa e uma base plana rugosa (lixa nº 100, do fabricante Carborundum Abrasivos), como observado na Figura 11a e 11b. Ao ser liberado o produto forma, na base, um talude cônico. Com auxílio de uma régua e um transferidor, determinou-se o ângulo que a parede do talude formava com a horizontal.

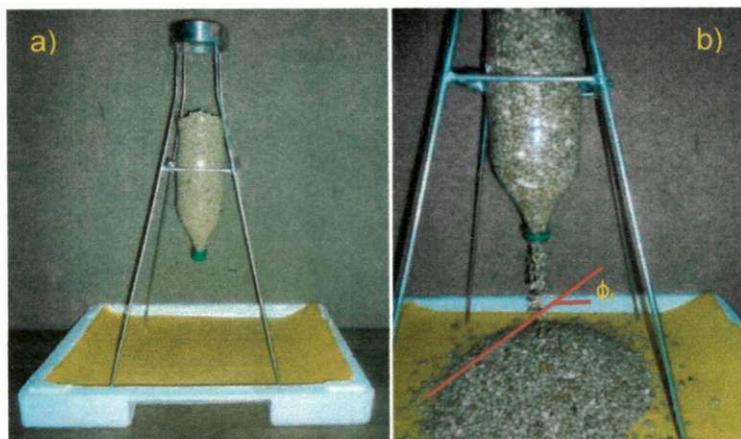


Figura 11 - Dispositivo construído para determinação do ângulo de repouso (ϕ_r)

3.1.2. Propriedades de Fluxo

As propriedades de fluxo inquiridas nesta dissertação foram: peso específico, em função da consolidação (γ), ângulo de atrito interno (ϕ), efetivo ângulo de atrito interno (δ), coesão (C), ângulo de atrito com a parede (ϕ_w); dessas informações foram determinados o coeficiente de atrito com a parede (μ) e o fator K, de forma indireta.

Para determinação das propriedades de fluxo adotou-se a metodologia recomendada pela BRITISH MATERIALS HANDLING BOARD – BMHB (1985) e, para aquisição dos dados, utilizou-se a célula de cisalhamento direto por translação (TSG 70-140), conhecida internacionalmente como “Jenike Shear Cell” (Figura 12).



Figura 12 - Célula de cisalhamento direto e aparelho (TSG 70-140)

De posse dos resultados e com o auxílio de um programa de computação gráfica, foram traçados os gráficos de tensão normal versus tensão de cisalhamento (σ, τ), para as cargas utilizadas, o que possibilitou traçar-se círculos de Mohr (Figura 13).

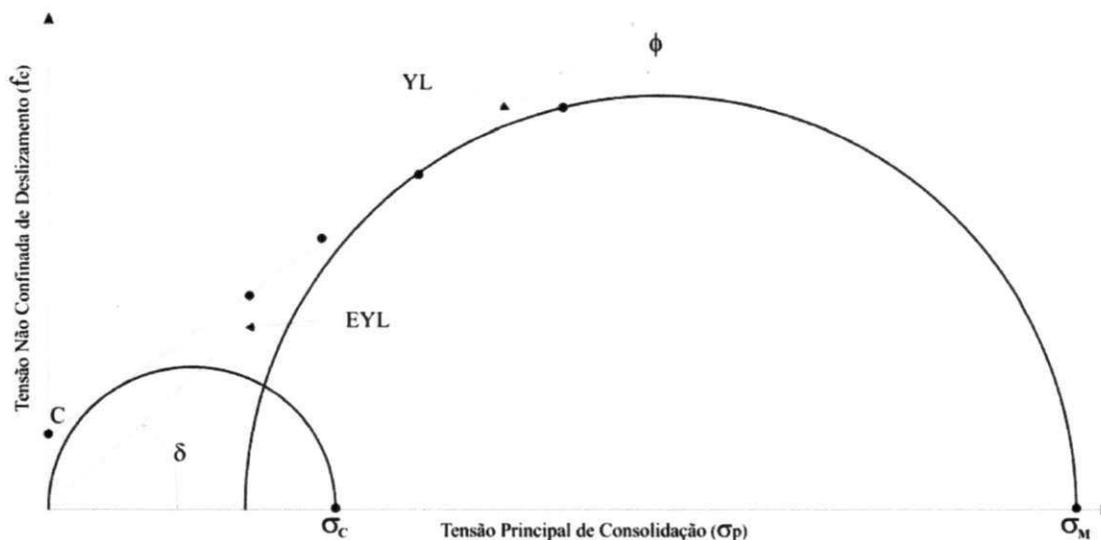


Figura 13 - Lugares geométricos e ângulos de atrito interno

Fonte: Adaptado de Lopes Neto (2009)

O ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) foi determinado pelo mesmo equipamento descrito acima, tendo uma mudança na base do anel inferior da célula de Jenike pela amostra do material de parede (aço rugoso), e também a carga adotada. O material de parede analisado foi escolhido por ser frequentemente empregado na construção de silos.

Os níveis de cargas normais adotados neste trabalho estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Níveis de cargas normais utilizados no ensaio de cisalhamento direto

| Cargas Normais | | |
|----------------------|------------------|------------------------------|
| Pré-Cisalhamento (N) | Cisalhamento (N) | Atrito com a parede (N) |
| 100 | 70 ; 50 ; 35 | |
| 70 | 50 ; 35 ; 20 | 50 ; 40 ; 30 ; 20 ; 10 ; 4,4 |
| 50 | 35 ; 20 ; 10 | |

O fator K, calculado de forma indireta, relaciona as pressões horizontais e verticais; foi estimado a partir das formulações de Aoki (1978), Frazer (1948) apud Lenczner (1963), Hartmann (1966) apud Hartlen et al. (1984) e Jaky (1948). Foram adotadas, também, as normas internacionais ACI 313 (1991), AS 3774 (1996), DIN 1055 (2005) e EUROCODE 1 (2006).

Na maioria das equações leva-se em conta o efetivo ângulo de atrito interno enquanto em outras, o ângulo de atrito com a parede em sua composição. As equações para estimativa do fator K se encontram relacionadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Equações propostas para determinação do fator K, pelos autores e normas internacionais

| Autores e Normas Internacionais | Equação proposta |
|---------------------------------|---|
| Aoki (1978) | $K = \left[1 + 2 \operatorname{tg}^2 \delta + \frac{4\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}{3\mu^2} \left\{ \operatorname{tg}^3 \delta - (\operatorname{tg}^2 \delta - \mu^2)^{\frac{3}{2}} \right\} \right]^{-1}$ $\mu = \tan \phi_w$ |
| Frazer (1948) | $K = \frac{1}{\frac{1 + \sin^2 \delta}{\cos^2 \delta} + \frac{2 \sin \delta}{\cos^2 \delta} \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \phi_w}{\operatorname{tg}^2 \delta}}}$ |
| Hartmann (1966) | $K = \frac{1 - \sin^2 \delta}{1 + \sin^2 \delta}$ |
| Jaky (1948) | $K = \frac{(1 - \sin \delta) \left(1 + \frac{2}{3} \sin \delta \right)}{1 + \sin \delta}$ |
| ACI 313 (1991) | $K = \frac{1 - \sin \delta}{1 + \sin \delta}$ |
| AS 3774 (1996) | $K = \frac{1 + (\sin^2 \delta) - 2\sqrt{\sin^2 \delta - \mu^2 \cos^2 \delta}}{4\mu^2 + \cos^2 \delta} \geq 0,35$ $\mu = \tan \phi_w$ |
| DIN 1055 (2005) | $K = 1,2(1 - \sin \delta)$ |
| EUROCODE 1 (2006) | $K = 1,1(1 - \sin \delta)$ |

Legenda: K: fator K; δ : efetivo ângulo de atrito interno; μ : coeficiente de atrito com a parede; ϕ_w : ângulo de atrito com a parede

Fonte: Adaptado de Lopes Neto (2009)

3.1.3. Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas determinadas neste tópico foram: Coeficiente de Poisson (ν), Módulo de Elasticidade (E) e o Ângulo de Dilatância (ψ).

Os parâmetros de elasticidade e plasticidade foram determinados pela compressão dos grãos e pós em estudo, com base na metodologia proposta por Sawicki (1994).

O procedimento consistiu de duas etapas: do carregamento (OA) e do descarregamento (AB e BC); o último se subdivide em outros dois estágios, o primeiro considerado retilíneo (AB) e o segundo curvilíneo (BC), como se observa na Figura 14.



Figura 14 - Diagrama de carga e descarga

Fonte: Adaptado de Molenda & Stasiak (2002)

O carregamento (OA) caracterizado pela compactação dos produtos é dotado de duas fases simultâneas no material: fase reversível (elástica) e fase irreversível (plástica), baseadas na teoria elasto-plástico.

O fator K_0 , calculado na etapa de carregamento representa a relação entre a pressão horizontal, σ_x , e a pressão vertical, σ_y , tendo, assim, uma dependência linear, como descrito pela Equação 6:

$$\sigma_x = k_0 \sigma_y \quad \text{Eq. (6)}$$

donde:

σ_x - Pressão horizontal, FL^{-2} ;

σ_y - Pressão vertical, FL^{-2} ; e

k_0 - Coeficiente de dependência linear, adimensional.

Nesta etapa a deformação total, ε_y , é composta de deformação plástica, ε_y^p , e deformação elástica, ε_y^e (Equação 7).

$$\varepsilon_y = \varepsilon_y^p + \varepsilon_y^e \quad \text{Eq. (7)}$$

sendo então a deformação plástica, ε_y^p , expressa pela Equação 8 e a deformação pela Equação 9:

$$\varepsilon_y^p = D_1 \ln(1 + D_2(\sigma_y)^\alpha) \quad \text{Eq. (8)}$$

$$\varepsilon_y^e = \frac{\sigma_y}{E} \left(1 - \frac{2\nu^{*2}}{1 - \nu^*} \right) \quad \text{Eq. (9)}$$

então, reorganizando a Equação 7, tem-se:

$$\varepsilon_y = D_1 \ln(1 + D_2(\sigma_y)^\alpha) + \frac{\sigma_y}{E} \left(1 - \frac{2\nu^{*2}}{1 - \nu^*} \right) \quad \text{Eq. (10)}$$

sendo o coeficiente de Poisson para o carregamento encontrado pela Equação 11,

$$\nu^* = \frac{k_0}{1 + k_0} \quad \text{Eq. (11)}$$

em que:

ε_y - Deformação total, L;

ε_y^p - Deformação plástica, L;

ε_y^e - Deformação elástica, L;

σ_y - Tensão vertical, FL⁻²;

E - Módulo de elasticidade, FL⁻²;

ν^* - Coeficiente de Poisson referente à fase de carregamento, adimensional,

D1, D2 - Parâmetros do modelo, adotados de Stasiak et al. (2001),
adimensional, e

α - Parâmetros do modelo determinado experimentalmente, adimensionais.

A segunda etapa do ensaio (descarregamento) se divide nos estágios AB e BC (Figura 14); no primeiro estágio (AB), a fração linear (retilínea) do gráfico é caracterizado, pela deformação elástica; nesse estágio são extraídas as informações sobre as constantes elásticas (módulo de elasticidade, E, e coeficiente de Poisson, ν); já o segundo estágio (BC) é caracterizado pela deformação elástica e plástica, simultaneamente (Equações 12 e 13).

Considera-se que o material é reversível sendo então regido pela lei de Hooke:

$$\varepsilon_x^e = \frac{1}{E} [(1 - \nu)\sigma_x - \nu\sigma_y] \quad \text{Eq. (12)}$$

$$\varepsilon_y^e = \frac{1}{E} [\sigma_y - 2\nu\sigma_x] \quad \text{Eq. (13)}$$

Durante o primeiro estágio (AB) observa-se, na descarga, uma relação linear, característico de deformação elástica (Equação 14).

$$\varepsilon_y = \varepsilon_y^e \quad \text{Eq. (14)}$$

Considera-se, neste processo, que a deformação horizontal total (deformação plástica e deformação elástica), seja igual a zero (Equação 15).

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^p + \varepsilon_x^e = 0 \quad \text{Eq. (15)}$$

então, a Equação 12 é reduzida à Equação 16:

$$\nu \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad \text{Eq. (16)}$$

Substituindo a Equação 16 na Equação 13, obtém-se:

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right) \quad \text{Eq. (17)}$$

As constantes elásticas foram determinadas a partir dos dados experimentais do estágio linear de descarga, obtidas pela relação entre pressão horizontal (σ_x) e pressão vertical (σ_y), consideradas, assim, constantes (estado elástico de tensão). Através do processo de regressão linear dos valores experimentais determinou-se, pela inclinação da linha reta, a relação apresentada pela Equação 18:

$$A = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \frac{\nu}{(1-\nu)} \quad \text{Eq. (18)}$$

Então, a partir da determinação da constante, A, o coeficiente de Poisson (ν) é encontrado através da Equação 19:

$$\nu = \frac{A}{1+A} \quad \text{Eq. (19)}$$

O módulo de elasticidade, E, foi determinado pela relação $\varepsilon_y(\sigma_y)$ da Equação 17, com os valores experimentais de ε_y e σ_y e pelo coeficiente de Poisson (ν), determinado como descrito acima, pela Equação 19.

O segundo estágio (BC), caracterizado pela parte não-linear (curvilínea) da descarga, se inicia quando a tensão vertical (σ_y), é menor que o valor da tensão horizontal (σ_x); nesse estágio as deformações elásticas e plásticas coexistem simultaneamente assumindo, assim, que os incrementos de tensão são iguais, isto é, $d\sigma_x = d\sigma_y$, significando uma relação constante. A deformação vertical deste estágio é determinada pela Equação 20:

$$\varepsilon_y = D_3 \ln [1 + D_4(\sigma_y)^\beta] + D_5\sigma_y \quad \text{Eq. (20)}$$

donde:

D3, D4 e β - Parâmetros plásticos, adotado de Stasiak et al. (2001), adimensional e

D5 - Parâmetro elástico, adotados de Stasiak et al. (2001), adimensional.

O módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$) foi obtido por meio do gráfico tensão-deformação utilizando-se os dados da segunda etapa do ensaio (descarregamento) do primeiro estágio (AB), em que se localiza a fração linear (retilínea), caracterizando-se, então, a deformação elástica; em seguida, obteve-se o coeficiente angular através da tangente cujo resultado é igual ao módulo de elasticidade experimental.

O coeficiente de Poisson experimental ($\nu_{exp.}$) foi obtido por meio da Equação 21.

$$\nu_{exp} = \frac{K_{exp}}{1 + K_{exp}} \quad \text{Eq. (21)}$$

Para encontrar o valor de $K_{exp.}$ que é a relação da pressão horizontal e a pressão vertical, foram realizados os seguintes cálculos:

➤ Pressão Vertical (P_V):

Foi realizada a divisão da força empregada pela máquina universal de ensaios pela área da tampa da célula de compressão; este procedimento ocorreu para todas as cargas em estudo (5, 10, 15 e 20 kN).

➤ Pressão Horizontal (P_H):

Para se chegar aos valores da pressão horizontal utilizaram-se as Equações 22 e 23.

$$\sigma = E_{barra} \cdot \varepsilon_{barra} \quad \text{Eq. (22)}$$

$$\sigma = \frac{F_{barra}}{A_{barra}} \quad \text{Eq. (23)}$$

Reorganizando as equações obteve-se a força para cada barra de alumínio; como o equipamento é composto de quatro barras realizou-se o somatório das forças; a Equação 24 foi aplicada para obtenção da pressão horizontal.

$$P_H = \frac{F_{\text{Somatório das barras}}}{A_{\text{semi-circulo}}} \quad \text{Eq. (24)}$$

donde,

σ - Tensão, FL⁻²;

E_{barra} - Módulo de elasticidade da barra, FL⁻²;

ϵ_{barra} - Deformação da barra, L;

F_{barra} - Força na barra, MLS⁻²;

A_{barra} - Área da seção transversal da barra, L²;

$A_{\text{semi-circulo}}$ - Área da seção longitudinal da célula de compressão, L².

O procedimento descrito acima foi empregado para se encontrar a pressão horizontal e vertical realizada em cada repetição de cada carga.

O ângulo de dilatância (ψ) utilizado para determinar a influência das distribuições de pressão sobre a parede do silo durante o carregamento e descarregamento, foi determinado usando-se os valores de deformação vertical e horizontal, como o exposto pela Equação 25:

$$\psi = \frac{\frac{\Delta\epsilon_y}{h_0}}{\frac{\Delta\epsilon_x}{L}} \quad \text{Eq. (25)}$$

donde:

ψ - Ângulo de dilatância, (°);

$\Delta\epsilon_y$ - Variação na deformação vertical ao longo do tempo, L;

$\Delta\epsilon_x$ - Variação na deformação horizontal ao longo do tempo, L;

h_0 - Altura inicial da amostra, L e

L - Comprimento inicial da amostra, L.

3.2. CONFEÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Com vista à determinação das propriedades mecânicas, ensaiou-se um equipamento que possibilitou a investigação das propriedades mecânicas dos produtos granulares e pulverulentos; todas as principais informações inerentes ao equipamento estão descritas neste tópico.

O equipamento é composto por dois semicírculos (A – ponto de fixação à base e B – extremidade livre), de raio 125,0 mm e altura de 200,0 mm; foi confeccionado em chapa de aço de espessura 6,35 mm (1/4"). A utilização dessa espessura baseou-se na necessidade de partes rígidas para que não sofressem deformações as quais, por outro lado, pudessem ser desprezadas; sua relação Altura/Diâmetro (H/D) é de 0,8 e o volume de $9,817 \times 10^{-3} \text{ m}^3$; possui duas abas laterais com distância entre si de 77,5 mm e equidistância das bordas de 55,0 mm e largura de 20,0 mm, em que foram posicionadas, em sua união, para fixação, quatro barras de alumínio, como apresentado na Figura 15.

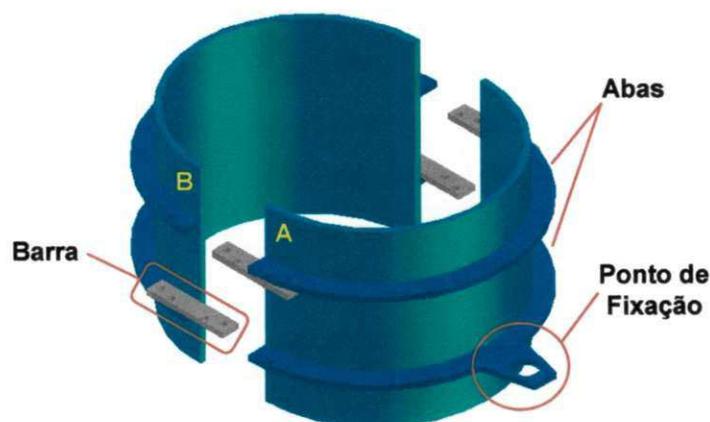


Figura 15 - Equipamento para determinação das propriedades mecânicas

Fazem parte deste conjunto duas tampas (Superior – com duas alças e Inferior – sem alças), circulares de mesmo material com diâmetro de 250,0 mm, onde foram apoiados uma célula de carga (Modelo LT 5/3; S/N: 057749; Item: 06-0124; FS: 30 kN da marca GUNT HAMBURG) para registrar a força de

compressão e um transdutor LVDT (marca KYOWA, capacidade máxima de 30 mm) para registrar o deslocamento vertical.

O equipamento foi apoiado em uma base de chapa de aço de 12,7 mm (1/2'), com 390 mm de comprimento e 500 mm de largura, sobre a qual, foram engastados três pinos equidistantes do centro e distantes entre si de 120° sendo um deles ponto fixo para ancoragem do equipamento e os outros dois utilizados como apoio (Figura 16a e 16b).

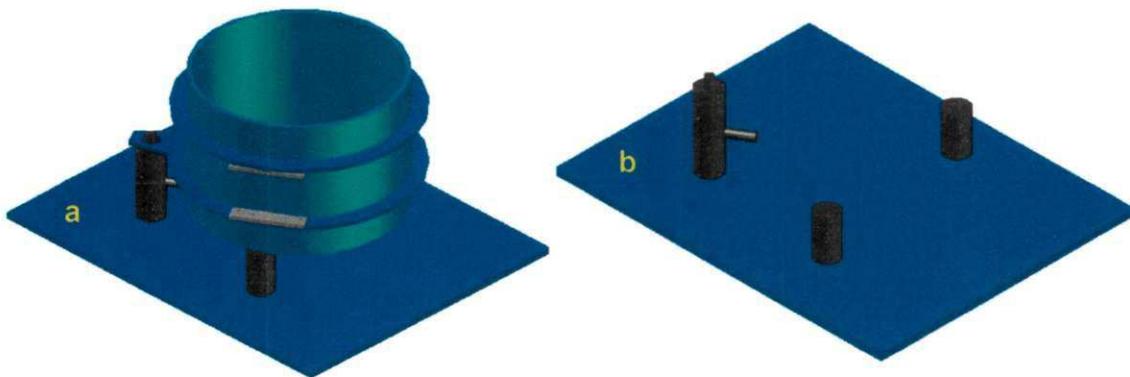


Figura 16 - a) Equipamento para determinação das propriedades mecânicas apoiado na base. b) Disposição dos pinos na base

Para a união dos semicírculos e fixação dos extensômetros, foram utilizadas quatro barras de liga de alumínio, com 90,0 mm de comprimento, 19,35 mm de largura e 6,35 mm de espessura as quais, por sua vez, foram unidas à estrutura do equipamento por meio de quatro parafusos allen com cabeça de diâmetro $\frac{1}{4} \times \frac{3}{4}$ de comprimento e arruelas de pressão.

Com a máquina universal de ensaios do modelo Autograh – AG-IS 100 kN da empresa Shimadzu, foi determinado o módulo de elasticidade das barras ($E = 16,8436$ GPa) através do ensaio de tração realizado em triplicata, como pode ser observado na Figura 17a e 17b.

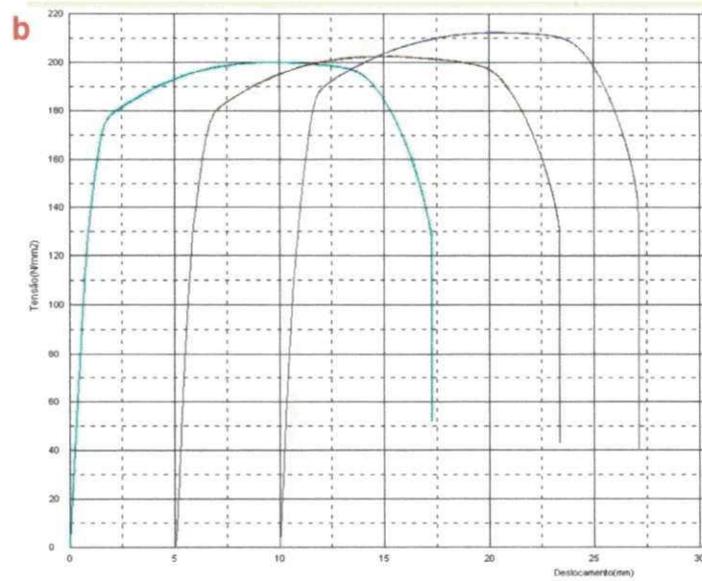


Figura 17 - a) Ensaio de Tração. b) Curvas características do ensaio de tração

3.3. INSTRUMENTAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS

3.3.1. Extensômetros

Como observado na Figura 18 foi posicionado, longitudinalmente, em cada barra, um extensômetro STRAIN GAGES, tipo KFG-5-120-C1-11, fator de escala de $2,12 \pm 1,0\%$ e fator de resistência de $119,8 \pm 0,2 \Omega$, da marca KYOWA – Kyowa Electronic Instruments CO., LTD, para medição da deformação do material, para cuja fixação foram adotadas as recomendações do fabricante do extensômetro.

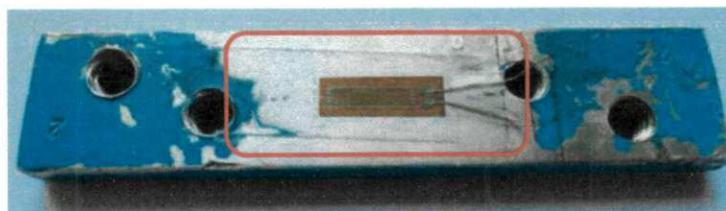


Figura 18 - Posicionamento e fixação do extensômetro na barra de alumínio

3.3.2. Aferição dos sensores de deslocamento e de força

Para aquisição de dados da presente pesquisa utilizou-se um sistema de medição de variáveis métricas e mecânicas, a partir de variações de potenciais elétricos do Modelo Spider8 600Hz de fabricação da HBM, com 8 entradas (Figura 19).



Figura 19 - Sistema de aquisição de dados

Efetuada a conexão e o reconhecimento dos sensores (deslocamento e força) pelo sistema de aquisição de dados, seguiu-se com a aferição.

Para aferição dos sensores (deslocamento e força) foi utilizada, como referência, a máquina universal de ensaios do modelo Autograh – AG-IS 100 kN da empresa Shimadzu.

O sensor de deslocamento foi fixado à base da máquina universal de ensaios, em que seu sensor de deslocamento foi zerado; a partir disto, um deslocamento conhecido foi empregado, para que o sistema Spider8 pudesse captar as variações elétricas e relacioná-las às variações métricas podendo, daí, criar uma representação confiável da realidade expressa no ensaio.

A Figura 20 ilustra uma das etapas de aferição do LVDT com as variações métricas/variações elétricas obtidas ao longo deste procedimento.

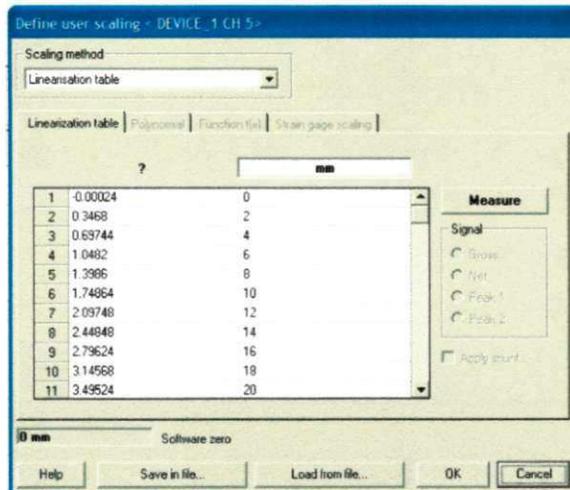


Figura 20 - Relação métrica/elétrica capturada pelo Spider8

Já para a célula de carga foram impostas várias cargas de valores conhecidos, em que o sistema de aquisição de dados pode captar as variações de potenciais elétricos e relacioná-los às variações de carga obtendo, uma relação confiável entre carga/variação elétrica.

A Figura 21 ilustra uma das etapas de aferição da célula de carga visualizando-se a relação entre carga e variação elétrica interpretada pelo Spider8.

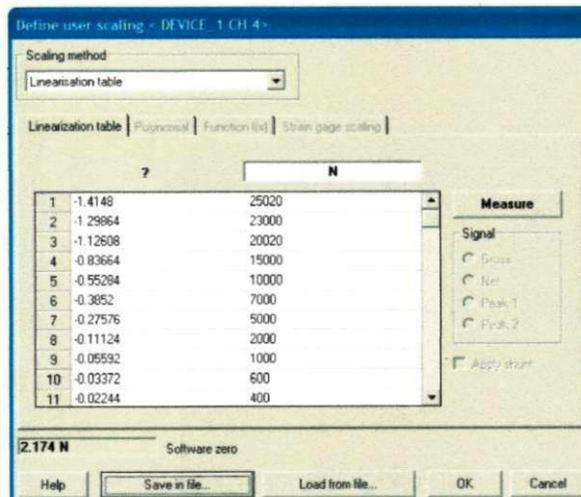


Figura 21 - Relação mecânica/elétrica capturada pelo Spider8

3.3.3. Programação do sistema de aquisição de dados

Com os sensores devidamente aferidos, realizou-se a configuração do sistema de aquisição de dados com auxílio do software Catman 4.5; para isto, os sensores foram conectados e reconhecidos pelo software e através de uma única janela foram adicionadas as configurações referentes a cada sensor, conforme a Figura 22.

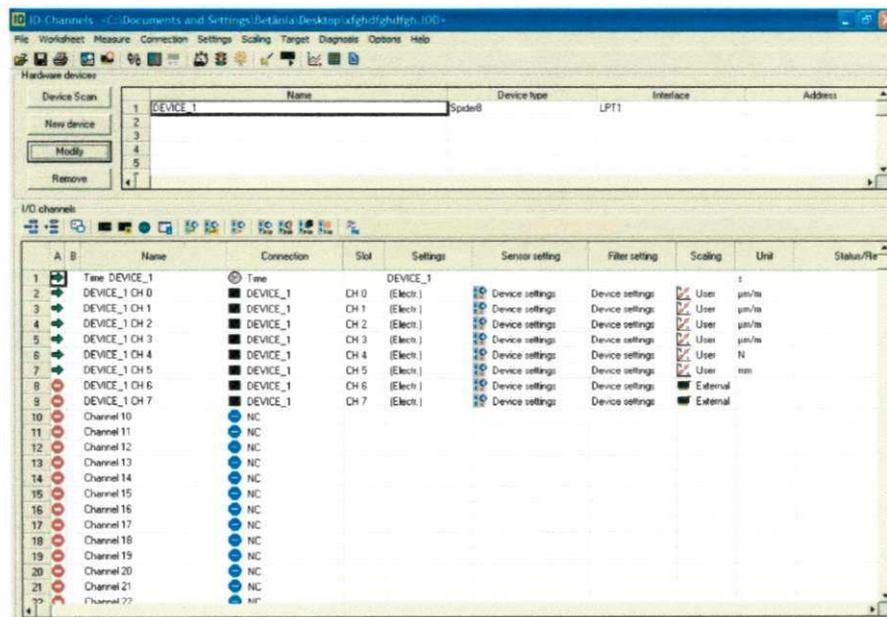


Figura 22 - Interface de configuração do Catman 4.5

O software Catman 4.5, foi programado para fazer a aquisição de dados a uma frequência de 1 Hz coletando, assim, informações a cada segundo de ensaio.

A interface final do software apresenta, ao usuário, um quadro na parte superior esquerda da tela que traz informações quantitativas dos sensores a cada registro; na parte superior direita um gráfico referente ao sensor LVDT; na parte inferior esquerda, um gráfico referente aos extensômetros e, por fim, no canto inferior direito um gráfico referente à célula de carga; esta interface pode ser vista na Figura 23.

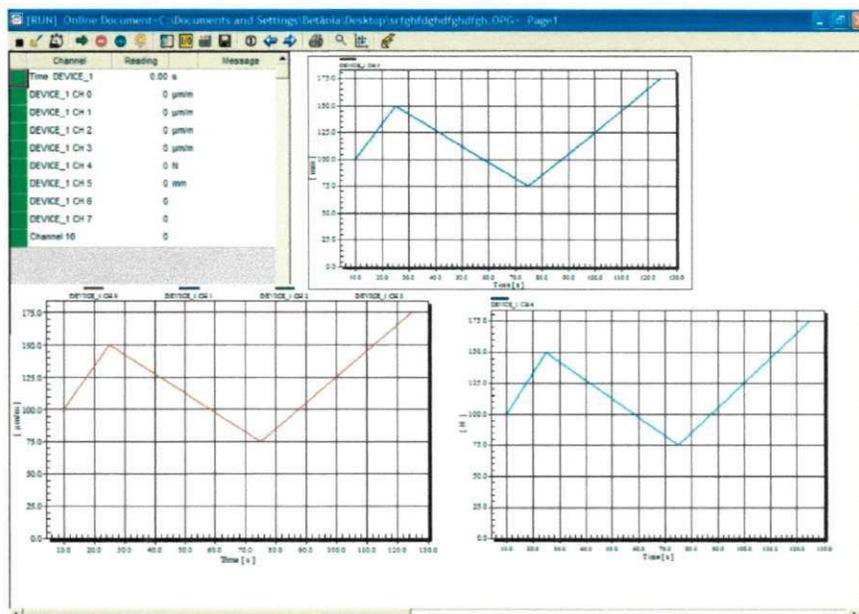


Figura 23 - Interface final de programação do Catman 4.5

3.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este tópico aborda os procedimentos empregados para aquisição de dados que visem à pesquisa.

Inicialmente, os produtos foram adquiridos no mercado local, e levados ao laboratório para determinação do teor de umidade. Os produtos que não estavam na faixa do teor de umidade estipulado previamente para pesquisa, eram colocados ao ar livre para absorver água e/ou levados à estufa para sua perda e quantificação.

Após a obtenção de uma massa com teor de umidade aproximadamente uniforme, deu-se início ao ensaio das propriedades físicas e de fluxo assim como às propriedades mecânicas.

A aquisição dos dados das propriedades mecânicas foi realizada no laboratório de materiais recicláveis e resíduos sólidos; o qual, em seguida, um computador com o software Catman 4.5; já instalado com o devido programa ao sistema de medição de variáveis métricas e mecânicas a partir de variações de potenciais elétricos o Spider8, como ilustra a Figura 24a; logo após foram efetuados a conexão e o reconhecimento dos sensores (deslocamento e força);

em seguida, o equipamento de determinação das propriedades mecânicas foi montado sobre a base da máquina universal de ensaios (Figura 24b).

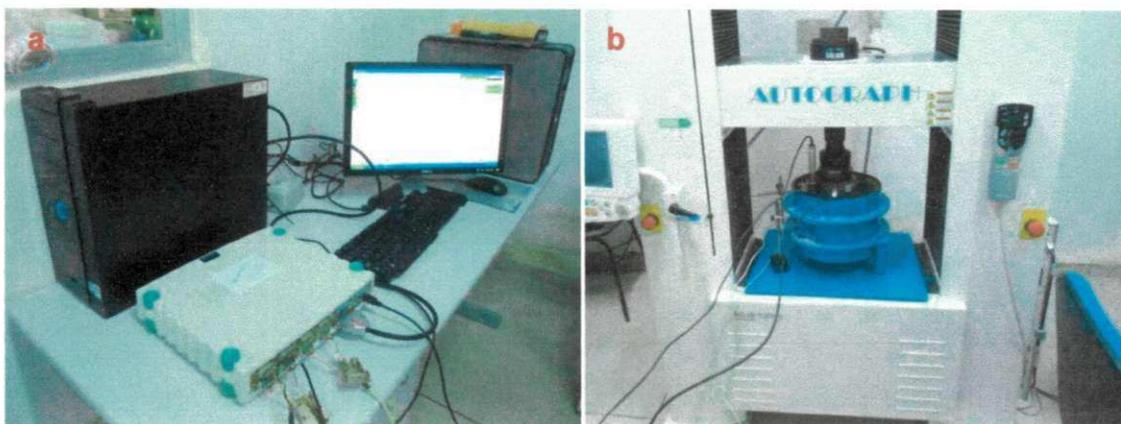


Figura 24 - a) Computador conectado ao Spider8 e ao equipamento de determinação de propriedades mecânicas. b) Vista do equipamento de determinação das propriedades mecânicas sobre a base da máquina de ensaio universal

O equipamento foi preenchido concentricamente e o produto nivelado na borda (Figura 25a); a tampa superior foi colocada e posicionados o LVDT e a célula de carga sobre a mesma (Figura 25b).

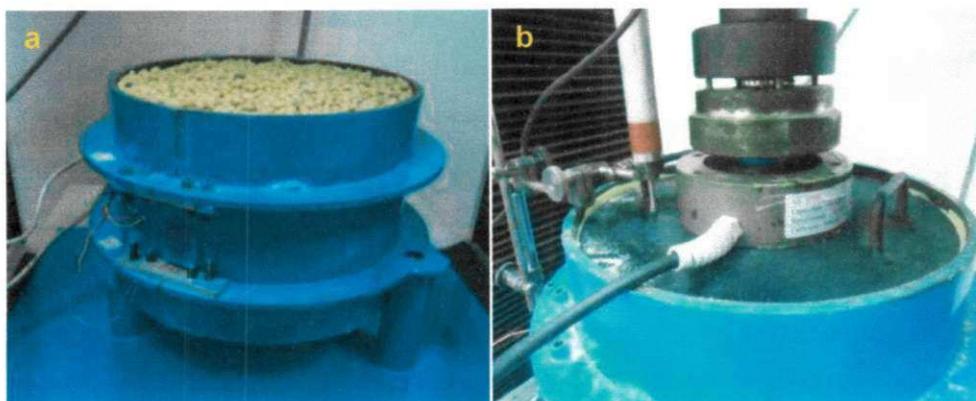


Figura 25 - a) Produto nivelado. b) Ensaio em andamento

A máquina universal de ensaio do modelo descrito acima foi aferida e zerada por meio do seu sistema e programada para realização de ensaios de compressão. A velocidade programada para os ensaios foi de 2 mm/mim. O pistão da máquina universal de ensaio que transmite e registra a força aplicada foi posicionado sobre a célula de carga e seu deslocamento zerado.

Após esses procedimentos deu-se início ao ensaio de compressão; primeiro, era dado o comando para aquisição de dados na programação feita no software Catman 4.5 e em seguida era acionada a máquina de ensaio universal. Quando a carga de referência era alcançada, por exemplo, 5 kN, era acionado o botão de parada na máquina universal de ensaio e imediatamente o pistão da máquina era submetido ao retorno do percurso até que o visor da máquina (Figura 26a e 26b), sinalizasse que a força aplicada fosse zerada.

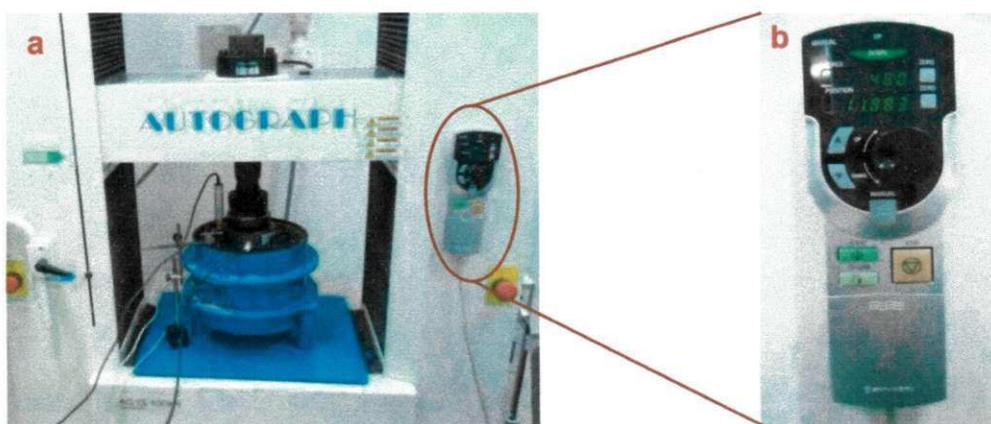


Figura 26 - a) Ensaio em andamento. b) Visor da máquina universal de ensaio em destaque

Quando a força aplicada fosse novamente zerada o sistema de aquisição de dados do software Catman 4.5 era interrompido e em sequência os dados eram salvos.

O produto ensaiado era retirado do equipamento de determinação das propriedades mecânicas e revolvido; logo em seguida, este material era devolvido ao interior do equipamento e se realizava novamente o procedimento descrito acima para as cargas de 5, 10, 15 e 20 kN em quadruplicata, para cada teor de umidade estudado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados encontrados pela pesquisa foram reunidos neste tópico, o qual era subdividido em produtos granulares e pulverulentos e as análises e discussões de suas respectivas propriedades (físicas, fluxo e mecânica) eram correlacionadas a outras pesquisas e normas internacionais visto que o Brasil ainda não apresenta uma norma relacionada a tais questões, podendo ser este estudo base para outros trabalhos que visem à melhoria da realidade nacional quanto à estruturação e armazenamento de grãos e pós.

Por falta de informações para os produtos estudados neste trabalho procurou-se fazer uma correlação dos produtos normatizados procurando, entre eles, suas características fisiológicas, espécie, tamanho e forma, dentre outras informações.

4.1. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GRÃOS

4.1.1. Granulometria

Nas Tabelas 9, 10 e 11 se encontram os resultados dos ensaios granulométricos do arroz, feijão e milho triturado, respectivamente, ambos com teor de umidade de 12% (b.u).

Tabela 9 - Análise granulométrica do arroz

| Produto | Peneira | Retido | Acumulado |
|---------|---------|--------|-----------|
| | (mm) | (%) | (%) |
| Arroz | 2,36 | 30,58 | 30,58 |
| | 1,40 | 69,42 | 100,00 |

Tabela 10 - Análise granulométrica do feijão

| Produto | Peneira | Retido | Acumulado |
|---------|---------|--------|-----------|
| | (mm) | (%) | (%) |
| Feijão | 4,76 | 96,96 | 96,96 |
| | 4,00 | 3,08 | 100,00 |

Tabela 11 - Análise granulométrica do milho triturado

| Produto | Peneira | Retido | Acumulado |
|-----------------|---------|--------|-----------|
| | (mm) | (%) | (%) |
| Milho Triturado | 1,40 | 86,21 | 86,21 |
| | 1,00 | 12,01 | 98,22 |
| | 0,59 | 1,29 | 99,51 |
| | 0,297 | 0,63 | 100,14 |
| | 63 | 0,46 | 100,60 |

Com base nos dados obtidos observa-se uma retenção maior nas peneiras: 1,40 mm (69,42%); 4,76 mm (96,96%) e 1,40 mm (86,21%), para o arroz, feijão e milho triturado, respectivamente.

Observou-se, também, maior distribuição granulométrica do milho triturado em relação aos outros produtos; além da peneira 1,40 mm, outra parte significativa de suas partículas ficou retida na peneira 1,0 mm (12,01%).

4.1.2. Ângulo de repouso

O ângulo de repouso para os produtos com teor de umidade de 12% (b.u) e após três repetições, foi de 23, 28 e 27° para o arroz, feijão e milho triturado, respectivamente.

Souza et al. (2012) obtiveram, analisando as propriedades físicas, sendo uma o ângulo de repouso, de quatro cultivares de feijão do tipo carioca, para um teor de umidade de 10,4% (b.u.) o valor de 28° como o encontrado por este trabalho.

Para os grãos de milho triturado, Batista (2009) encontrou valor para o ângulo de repouso de 29,3°, para um diâmetro de partícula de 1,8 mm, próximo do resultado desta pesquisa.

Silva & Correia (2000) apud Silva et al. (2006), afirmam ser o ângulo de repouso altamente influenciado pelo teor de umidade do produto confirmando tal informação através de vários resultados de pesquisas com vários produtos, dentre eles, trigo, cevada e milho.

4.2. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PRODUTOS PULVERULENTOS

4.2.1. Granulometria

Nas Tabelas 12 e 13 se encontram os resultados dos ensaios granulométricos da farinha de mandioca e de milho, respectivamente, ambos com teor de umidade de 12% (b.u).

Tabela 12 - Resultado da análise granulométrica da farinha de mandioca

| Produto | Peneira | Retido | Acumulado |
|------------------------|---------|--------|-----------|
| | (mm) | (%) | (%) |
| Farinha de Mandioca | 1,00 | 17,45 | 17,45 |
| | 0,297 | 59,65 | 77,10 |
| | 0,149 | 14,30 | 91,40 |
| | 0,105 | 8,60 | 100,00 |

Tabela 13 - Resultado da análise granulométrica da farinha de milho

| Produto | Peneira | Retido | Acumulado |
|---------------------|---------|--------|-----------|
| | (mm) | (%) | (%) |
| Farinha de Milho | 1,00 | 15,78 | 15,78 |
| | 0,297 | 64,64 | 80,42 |
| | 0,149 | 12,00 | 92,42 |
| | 0,105 | 7,58 | 100,00 |

Constatou-se, através do ensaio de granulometria, que a maior retenção dos produtos foi para a peneira de 0,297 mm, em que 59,65% e 64,64% da massa das partículas de farinha de mandioca e de milho, respectivamente, foram retidos, podendo-se, considerar que não houve diferença entre os produtos.

Ambos os produtos obtiveram uma distribuição granulométrica maior; além da peneira de 0,297 mm, outra parte significativa de suas partículas ficou retida na peneira 1,0 mm, 17,45 e 15,78%, respectivamente para a farinha de mandioca e de milho.

4.2.2. Ângulo de repouso

O ângulo de repouso para os produtos com teor de umidade de 12% (b.u) e após três repetições, foi de 55, 51° para a farinha de mandioca e de milho, respectivamente.

Tuohy (1989) apud Campos (2012) concluiu, ao determinar o ângulo de repouso para leite em pó integral, que seu valor estava na faixa de 40 a 58°; portanto, comparando-se esses valores aos encontrados neste trabalho, concluiu-se que os valores obtidos para a farinha de mandioca e de milho em comparação a outros produtos alimentícios pulverulentos, estão de acordo com os da literatura.

4.3. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES DE FLUXO DOS GRÃOS

Na Tabela 14 se encontram, para os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.), os resultados das propriedades de fluxo dos produtos granulares (arroz, feijão e milho triturado) na condição instantânea.

As propriedades peso específico (γ), ângulo de atrito interno (ϕ) e ângulo efetivo de atrito interno (δ), são apresentadas em seus valores máximos e mínimos com o intuito de atender à norma Australiana (AS 3774, 1996), já que o Brasil não possui norma específica podendo então, auxiliar os projetos de silo, por meio do método dos estados limites.

Encontram-se também, na Tabela 14, as propriedades de coesão (C) e o índice de fluxo (ff_c).

Tabela 14 - Propriedades de fluxo dos produtos granulares

| Produtos | U | γ | | ϕ | | δ | | C | ff_c |
|-----------------|----|----------|---------|--------|-----|----------|-----|---------|--------|
| | | inf | sup | inf | sup | inf | sup | | |
| Arroz | 10 | 7955,89 | 8025,32 | 22 | 49 | 30 | 73 | 5734,20 | 4,25 |
| | 12 | 8037,07 | 8112,37 | 31 | 37 | 46 | 50 | 3267,60 | |
| | 14 | 8118,26 | 8189,10 | 40 | 43 | 43 | 47 | 1453,80 | |
| Feijão | 10 | 8367,65 | 8398,09 | 18 | 23 | 24 | 29 | 1730,50 | 9,21 |
| | 12 | 8407,17 | 8461,11 | 16 | 25 | 27 | 38 | 2531,30 | |
| | 14 | 8261,91 | 8445,09 | 24 | 26 | 26 | 30 | 1035,20 | |
| Milho Triturado | 10 | 7944,67 | 8057,89 | 41 | 42 | 49 | 70 | 5601,10 | 2,24 |
| | 12 | 7613,02 | 7735,85 | 39 | 47 | 56 | 60 | 5219,70 | |
| | 14 | 7721,97 | 7858,69 | 43 | 46 | 52 | 54 | 2424,50 | |

U = teor de umidade (%); γ = peso específico consolidado ($N.m^{-3}$); ϕ = ângulo de atrito interno ($^{\circ}$); δ = efetivo ângulo de atrito interno ($^{\circ}$); C = coesão (Pa); ff_c = índice de fluxo; inf = limite inferior; sup = limite superior

4.3.1. Peso específico consolidado (γ)

O peso específico consolidado (γ) é uma propriedade importante a ser mensurada haja vista a influência que tem nos cálculos dos projetos de silos, influenciando as pressões exercidas pelo produto, nas paredes e no fundo do silo.

Os resultados do peso específico consolidado (γ) do arroz (Tabela 14), apresentaram valores médios de 7990,60; 8074,72 e 8153,68 $N.m^{-3}$ para os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.), respectivamente; em relação ao menor teor de umidade houve um aumento de 1,05 e 1,02% no peso específico (γ), para os teores de umidade de 12 e 14% (b.u.).

Observou-se que o arroz teve um acréscimo no peso específico consolidado (γ), com o aumento do teor de umidade. Silva (2008) identificou um aumento de 0,34%, entre os teores de umidade de 12 e 14% (b.u.).

Para o feijão os resultados médios apresentados na Tabela 14 para o peso específico consolidado (γ) foram de 8382,87; 8434,14 e 8353,50 $N.m^{-3}$ para os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.), respectivamente; em comparação com o valor obtido para o teor de 10% (b.u.) verificou-se que o peso específico consolidado (γ) para o teor de umidade de 12% (b.u.) apresentou um aumento de

1,0% enquanto para o teor de umidade de 14% (b.u.) ocorreu um decréscimo de 1,0%.

O feijão apresentou uma constante para o seu peso específico consolidado (γ) dos três teores de umidade analisados, fazendo-se uma pequena ressalva para o teor de umidade de 12%, pois este apresentou um aumento sendo que o valor esperado teria que ser intermediário aos valores encontrados para os teores extremos da umidade.

Os resultados médios do milho triturado (Tabela 14) para a propriedade do peso específico consolidado (γ) foram de 8001,28; 7674,43 e 7790,33 N.m⁻³ para os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.) respectivamente. Tomando como base o teor de umidade de 10% (b.u.) notou-se, para os outros teores de umidade, uma redução de 4,08 e 2,64% para os teores de umidade de 12 e 14% (b.u.), respectivamente.

O milho triturado apresentou um comportamento esperado em que, ao sofrer acréscimo do teor de umidade, seu peso específico consolidado (γ) diminuiria, pois suas partículas tendem a ter um aumento volumétrico diminuindo, portanto, o volume ocupado pelas partículas. Necessita-se fazer uma ressalva para o teor de umidade de 12% (b.u.), haja vista que o valor encontrado foi menor em relação ao teor de umidade de 14% (b.u.), o que, pela lógica, seu valor deveria estar compreendido entre os valores extremos. Essa implicabilidade pode ter ocorrido devido ao maior fracionamento de suas partículas.

Com o intuito de relacionar os dados obtidos nesta obra com os dados encontrados em normas internacionais, procurou-se correlacionar o arroz e o trigo em virtude de, ou seja, terem um formato parecido, o feijão com a soja, por serem uma leguminosa e o milho triturado com milho por se tratar da mesma família possuindo apenas granulometria distinta, já que nas mesmas não são referenciados os produtos aqui trabalhados.

Para a propriedade de peso específico consolidado (γ) visualiza-se que os valores inferiores e superiores do arroz encontram-se dentro da faixa estabelecida pelas normas AS 3774 (1996) e EUROCODE 1 (2006), sendo estes 7500 e 9000 N.m⁻³ valores inferiores e superiores, respectivamente.

O feijão obteve valores para o peso específico consolidado (γ), um pouco acima ao das normas AS 3774 (1996) e EUROCODE 1 (2006), em que o limite

superior é de 8000 N.m^{-3} mas ficando dentro da faixa estabelecida pela norma ACI 313 (1991) que é de 7400 e 9900 N.m^{-3} , valores inferiores e superiores, respectivamente.

O peso específico consolidado (γ) do milho triturado se encontra dentro da faixa estabelecida pela norma AS 3774 (1996) sendo 7000 e 8500 N.m^{-3} , valores inferiores e superiores, respectivamente, e pela norma EUROCODE 1 (2006) cujos os valores são de 7000 e 8000 N.m^{-3} , inferiores e superiores, respectivamente.

Pode-se recomendar a utilização dos valores médios entre os teores de umidade para o cálculo de estruturas de silos visto que, em uma massa homogênea de grãos, há a possibilidade de uma variação do peso específico consolidado (γ), para mais ou para menos.

4.3.2. Ângulo de atrito interno (ϕ), Efetivo ângulo de atrito interno (δ) e Coesão (C)

O ângulo de atrito interno (ϕ), efetivo ângulo de atrito interno (δ) e coesão (C), se encontram na Tabela 14, sendo os valores do arroz em função de seu teor de umidade, a 10% (b.u.): 22 a 49° , 30 a 73° e $5734,20 \text{ Pa}$, respectivamente; a 12% (b.u.): 31 a 37° , 46 a 50° e $3267,60 \text{ Pa}$, respectivamente; a 14% (b.u.): 40 a 43° , 43 a 47° e $1453,80 \text{ Pa}$, respectivamente.

Observou-se uma variação abrupta entre o valor inferior e o superior para os dados do ângulo de atrito interno (ϕ) e efetivo ângulo de atrito interno (δ), dos grãos de arroz com teor de umidade de 10% (b.u.); esta variação foi de 27° e 43° , respectivamente, podendo creditar, a esta ocorrência, o fato do baixo teor de umidade e do formato do grão (oblongo).

Para os outros teores de umidade os grãos de arroz apresentaram outros comportamentos, como o de um acréscimo progressivo para o ângulo de atrito interno (ϕ) de 12° em função do aumento do teor de umidade; já para o efetivo ângulo de atrito interno (δ), esta variação foi de 7° (limite inferior) em função do decréscimo do teor de umidade.

Segundo Calil Junior (1990) esta variação é desprezível devido às variações nas propriedades dos produtos recomendando-se, então, para o

projeto, o aumento ou a redução de 10° no efetivo ângulo de atrito interno para confecção de projetos.

A coesão (C) dos grãos de arroz apresentou redução dos valores com o acréscimo do teor de umidade, de 43% do teor de umidade de 10% (b.u) para o de 12% e de 55,51% do teor de umidade de 12% para o de 14%.

Para os grãos de feijão (Tabela 14) em função do seu teor de umidade apresentou os seguintes valores para o ângulo de atrito interno (ϕ), efetivo ângulo de atrito interno (δ) e coesão (C), a 10% (b.u.): 18 a 23°, 24 a 29° e 1730,50 Pa, respectivamente; a 12% (b.u.): 16 a 25°, 27 a 38° e 2531,30 Pa, respectivamente; a 14%(b.u.): 24 a 26°, 26 a 30° e 1035,20 Pa, respectivamente.

Constatou-se para os grãos de feijão, que seu ângulo de atrito interno (ϕ), apresentou crescimento progressivo de seus valores, e valor limite inferior de 18° e valor limite superior de 26° em relação ao aumento do teor de umidade.

O efetivo ângulo de atrito interno (δ) apresentou um intervalo de 24 a 38° fazendo, assim, menção para o teor de umidade de 12% (b.u.), que indicou o maior valor, contrariando a tendência de aumento com o acréscimo do teor de umidade.

A coesão (c), dos grãos de feijão passou por um aumento de seu valor entre os teores de umidade de 10 e 12% (b.u.) de 31,63% e uma redução do valor entre os teores de 12 e 14% (b.u.) de 59,1%.

Na Tabela 14 o ângulo de atrito interno (ϕ), efetivo ângulo de atrito interno (δ) e coesão (C) em função do teor de umidade, apresentaram os seguintes valores para os grãos de milho triturado, a 10% (b.u.): 41 a 42°, 49 a 70° e 5601,10 Pa, respectivamente; a 12% (b.u.): 39 a 47°, 56 a 60° e 5219,70 Pa, respectivamente e a 14% (b.u.): 43 a 46°, 52 a 54° e 2424,50 Pa, respectivamente.

Analisando os valores dos dados para os grãos de milho triturado observou-se que o intervalo de valores dos limites inferior e superior, do ângulo de atrito interno (ϕ), em função do teor de umidade foi de 39 e 47°, respectivamente, chamando a atenção para a ocorrência ter acontecido no teor de umidade de 12% (b.u.), havendo, uma coerência de acréscimo do ângulo entre os teores de umidade de 10 e 14% (b.u.).

O efetivo ângulo de atrito interno (δ) dos grãos do milho triturado, também chamou a atenção para o intervalo dos limites inferior e superior, que foram de 49

e 70°, respectivamente; limitando-se ao teor de umidade de 10% (b.u.) observou-se também um decréscimo do ângulo para o aumento do teor de umidade de 12% para 14% e seu intervalo foi de 52 e 60° para os limites inferior e superior, respectivamente.

A coesão (C) obtida pelos grãos de milho triturado apresentou redução de seus valores com o aumento do teor de umidade, de 6,81% do teor de umidade de 10% (b.u) para o de 12% e de 53,55% do teor de umidade de 12% para o de 14%.

Em Silva et al. (2006), verificam-se resultados semelhantes ao deste trabalho em que o ângulo de atrito interno (ϕ) foi estatisticamente superior ao ângulo de repouso em praticamente todos os teores de umidade variando apenas para a variedade café catuaí vermelho.

Chaves et al. (2005) apud Silva et al. (2006), também encontraram, trabalhando com grãos de soja, arroz e alpiste, valores equivalentes entre os ângulos de atrito interno (ϕ), para o arroz e alpiste diferindo apenas para soja, como foi encontrado neste trabalho para o feijão.

4.3.3. Índice de Fluxo (ff_c)

O índice de fluxo (ff_c) dos grãos de arroz, feijão e milho triturado (Tabela 14), atingiu valores médios de 4,25, 9,21 e 2,24, respectivamente.

Apesar dos dados serem apresentados como média e se tomando como base a classificação de Jenike (1964), os grãos de arroz apresentam, conforme a classificação, um índice de fluxo em uma zona de transição entre o fluxo coesivo e o fácil; para os grãos de feijão o índice, segundo a classificação, apresentou fluxo fácil; o valor do índice de fluxo dos grãos de milho triturado mostrou-se em uma zona de transição que correspondeu à classificação de fluxo muito coesivo a coesivo; uma das prováveis causas para contribuição desta classificação foi a maior distribuição granulométrica das partículas.

Lopez Neto & Nascimento (2013) encontraram, em seu trabalho referente ao milho triturado, um índice de fluxo de 3,8 classificado com possibilidade de fluxo do tipo coesivo com base na equivalência, neste trabalho.

4.3.4. Ângulos de atrito com a parede (ϕ_w)

Na Figura 27 se encontram os valores dos ângulos de atrito com a parede (ϕ_w), para os grãos de arroz, feijão e milho triturado, em função do teor de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.) e do material da parede analisado, o aço rugoso.

O aço rugoso foi escolhido em virtude de ser o material mais comumente utilizado na fabricação de silos; também foi constituinte principal do equipamento para determinação das propriedades mecânicas.

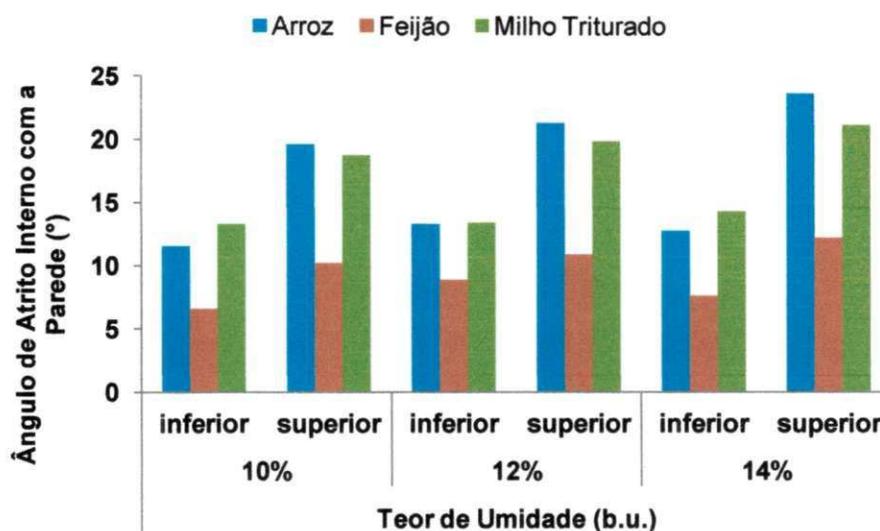


Figura 27 - Ângulo de atrito interno com a parede (ϕ_w), de aço rugoso dos produtos granulares

Para todos os produtos analisados ocorreu um acréscimo dos valores do ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) devido ao aumento do teor de umidade.

Os valores detectados para o limite inferior dos ângulos de atrito com a parede (ϕ_w) foram, para o teor de umidade, de 10% (b.u.) e para os grãos de arroz, de 11,52°, para os grãos de feijão, de 6,55° e para os grãos de milho triturado de 13,28°; para o teor de umidade de 12% (b.u.), para os grãos de arroz foi de 13,28°, para os grãos de feijão, de 8,86° e para os grãos de milho triturado, de 13,41°; para o teor de umidade de 14% (b.u.) para os grãos de arroz foram de 12,77°, para os grãos de feijão, de 7,67° e para os grãos de milho triturado, de 14,31°.

Os valores detectados para o limite superior dos ângulos de atrito com a parede (ϕ_w), para o teor de umidade de 10% (b.u.), para os grãos de arroz, foram

de 19,62°, para os grãos de feijão, de 10,18° e para os grãos de milho triturado de 18,75°; para o teor de umidade de 12% (b.u.); para os grãos de arroz foram 21,31°, para os grãos de feijão, de 10,90° e para os grãos de milho triturado foi de 19,90°; para o teor de umidade de 14% (b.u.), para os grãos de arroz foi 23,68°, para os grãos de feijão foi de 12,21° e para os grãos de milho triturado, de 21,18°.

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

4.3.5. Fator K dos grãos

Com base nas propriedades de fluxo, dos grãos de arroz, feijão e milho triturado determinadas no aparelho de Jenike (Jenike Shear Tester), foram calculados, de forma indireta, os valores do fator K utilizando-se as fórmulas propostas pelos autores Aoki (1978), Frazer (1948), Hartmann (1966) e Jaky (1948) e pelas equações das principais normas internacionais, ACI 313 (1991), AS 3774 (1996), DIN 1055 (2005) e EUROCODE 1 (2006).

Com os dados das pressões horizontal e vertical obtidas no equipamento de determinação das propriedades mecânicas durante os ensaios, foi possível calcular o fator K experimental ($K_{exp.}$), assim chamado, e compará-lo aos valores empíricos das equações dos autores e das normas internacionais.

Os valores do fator K encontrados pelas equações dos autores e o experimental ($K_{exp.}$), ilustram as Figuras 28, 29 e 30, que correspondem aos grãos de arroz, feijão e milho triturado, respectivamente.

As Figuras 31, 32 e 33 apresentam os valores do fator K obtidos a partir das equações propostas pelas normas internacionais e também os valores do fator K experimental ($K_{exp.}$), para os grãos de arroz, feijão e milho triturado, respectivamente.

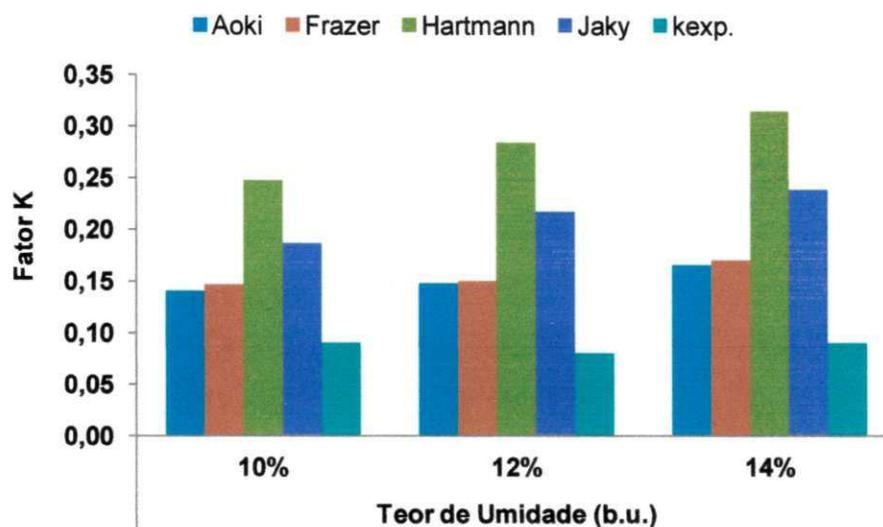


Figura 28 - Fator K para grãos de arroz

Fazendo uma análise nos resultados apresentados na Figura 28 para os grãos de arroz, observa-se que os valores obtidos pela equação de Hartmann (1966) foram mais conservadores que os valores encontrados pela equação de Aoki (1978), o que foi observado para todos os teores de umidade.

Todos os valores encontrados através das equações dos autores supracitados na Figura 28, apresentaram aumento dos valores em relação ao aumento do teor de umidade.

O valor do fator K experimental para os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.), é de 36, 28,5 e 28,1%, respectivamente, do valor encontrado pela equação de Hartmann (1966), mais conservadora das equações estudadas, para os mesmos teores de umidade.

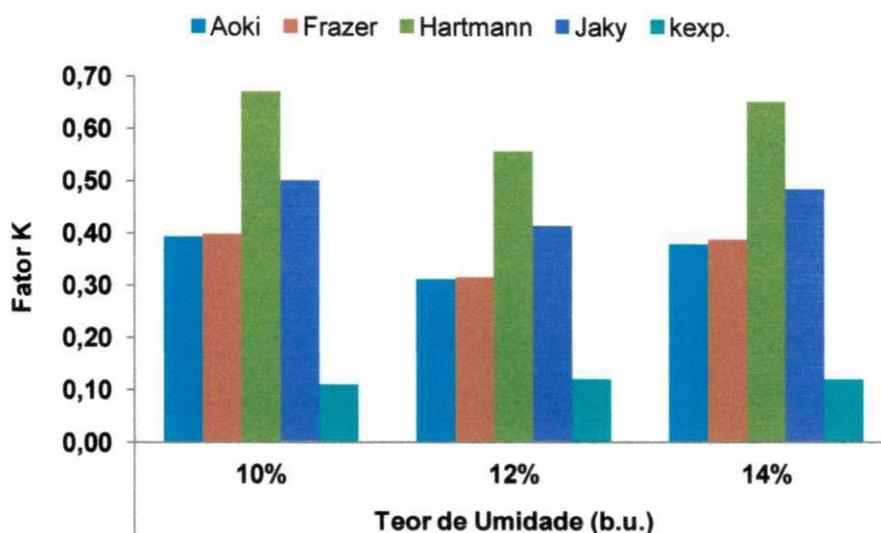


Figura 29 - Fator K para grãos de feijão

Para os grãos de feijão os valores do fator K obtidos empiricamente apresentaram uma oscilação de seus valores, em que os maiores valores observados são para o teor de umidade de 10% (b.u.) e valores menores para o teor de umidade de 12% (b.u.). O resultado do fator K experimental ($K_{exp.}$), se manteve praticamente constante para todos os teores de umidade.

O maior valor obtido pelas equações foi o valor encontrado pela de Hartmann (1966) e o menor foi encontrado pela de Aoki (1978).

Analisando a diferença encontrada entre os valores obtidos pela equação de Hartmann (1966) e os valores experimentais, pode-se observar que a diferença foi de 83,6, 78,6 e 81,6% para os respectivos teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.).

Os valores de Aoki (1978) e Frazer (1948) apresentaram pequena variação entre os resultados dos teores de umidade.

Nascimento & Calil Junior (2009), encontraram, trabalhando com soja com teores de umidade média de 11% (b.u.) valores aproximados ao deste trabalho para o fator K calculado pelas equações de 0,37, 0,49 e 0,27, respectivamente, para Jaky (1948), Hartmann (1966) e Frazer (1948), os quais são comparados aos valores dos grãos de feijão; entretanto, para o fator K experimental os autores obtiveram um valor de 0,34 de 64,7% maior que o valor encontrado nesta pesquisa.

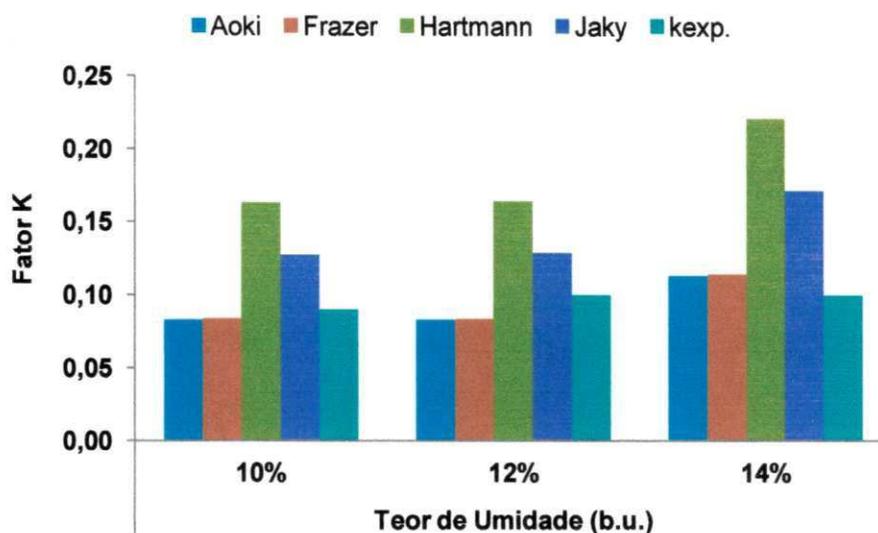


Figura 30 - Fator K para grãos de milho triturado

Observando a Figura 30 que expressa o resultado do fator K encontrado para os grãos de milho triturado, pode-se constatar que os valores se mantiveram com os mesmos valores para o teor de umidade de 10 e 12% (b.u.), tendo um acréscimo para o teor de umidade de 14% (b.u.). O fator K experimental ($K_{exp.}$), se manteve praticamente constante para todos os teores de umidade.

A equação de Hartmann (1966) apresentou os maiores valores para todos os teores de umidade mostrando, assim, ser uma equação conservacionista em relação às outras estudadas. Os resultados do fator K experimental ($K_{exp.}$), apresentaram uma diferença de 56,2, 62,5, 45,5%, respectivamente, para os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.), em relação aos resultados apresentados pela equação de Hartmann (1966).

Nota-se, para os teores de umidade de 10 e 12% (b.u.) que os valores obtidos pelas equações de Aoki (1978) e Frazer (1948) se mantiveram abaixo do valor experimental e para o teor de 14% (b.u.) ocorreu uma inversão sendo considerada inexpressiva.

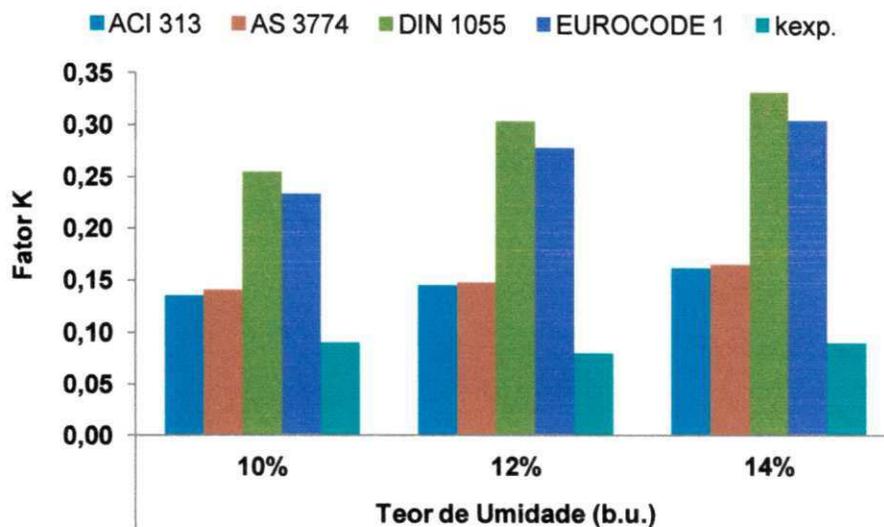


Figura 31 - Fator K para grãos de arroz

Analisando os resultados obtidos pelas equações das normas internacionais para os grãos de arroz, observa-se que os valores foram acrescidos com o aumento do teor de umidade e a norma DIN 1055 (2005) foi a que apresentou maior valor enquanto os resultados das normas ACI 313 (1991) e AS 3774 (1996) se mantiveram praticamente constantes variando entre elas apenas 0,01(ou 7,1%) para os teores de 10 e 14% (b.u.).

O fator K experimental ($K_{exp.}$) apresentou valores aproximadamente constantes para todos os teores de umidade; seus valores respectivos ao teor de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.), foram 36, 26,7 e 27,3% dos valores mais conservadores, valores esses encontrados pela equação proposta pela norma DIN 1055 (2005).

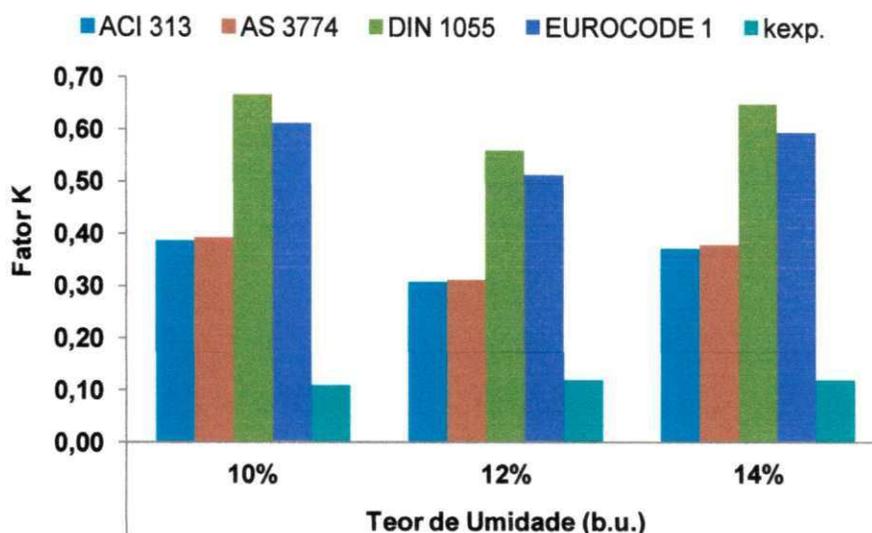


Figura 32 - Fator K para grãos de feijão

A Figura 32 apresenta os valores do fator K obtidos para os grãos de feijão a partir das equações das normas internacionais e os valores experimentais.

Nota-se uma oscilação de valores das normas internacionais no decorrer do aumento do teor de umidade, sendo os maiores valores notados para o teor de umidade de 10% (b.u.) e os menores para o teor de 12% (b.u.); já os valores experimentais se mantiveram praticamente constantes havendo apenas um acréscimo do valor de 0,01 (ou 8,3%) em relação ao teor de umidade 10% (b.u.).

Tal como os resultados experimentais, os calculados pelas equações das normas ACI 313 (1991) e AS 3774 (1996) sofreram uma variação de seu fator K de 0,01 em todos os teores de umidade.

Ao se comparar os valores obtidos pela norma DIN 1055 (2005) com os valores experimentais, observa-se que o calculado apresenta valores superiores de 83,6, 78,6, e 81,5%, para os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.), respectivamente, com o mesmo de se comparar os valores da norma AC 313 (1991), com os valores experimentais já que essa norma foi a menos conservadora, sendo os valores calculados 71,8, 61,3 e 67,6%, superiores para os respectivos teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.).

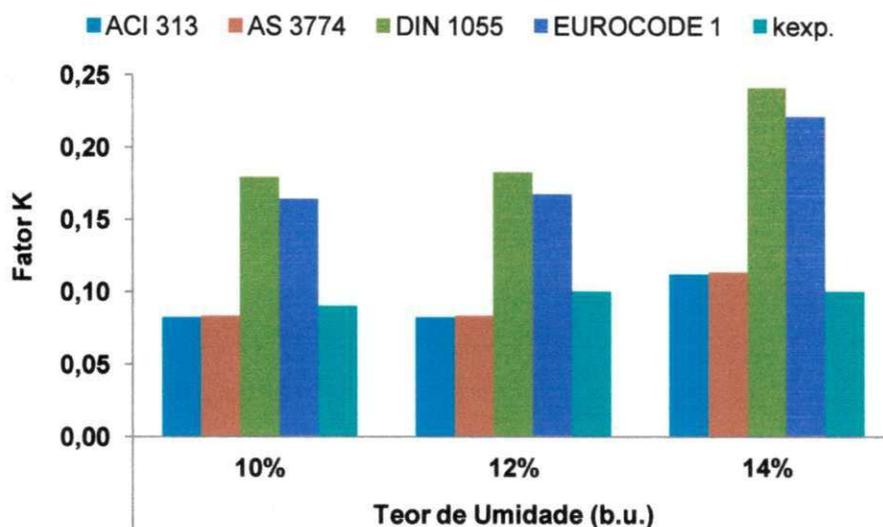


Figura 33 - Fator K para grãos de milho triturado

Os valores do fator K calculados pelas normas internacionais para os grãos de milho triturado ilustrado pela Figura 33, mostraram-se iguais para os teores de umidade de 10 e 12% (b.u.), sendo a norma EUROCODE 1 (2006), a que apresentou uma diferença 0,01 para esses dois teores de umidade. Em contrapartida, o valor experimental para o teor de umidade de 12 e 14% (b.u.) permaneceu constante (0,10), ocorrendo uma redução no valor de 0,01 para o teor de umidade de 10% (b.u.).

Para o milho triturado o fator K experimental ($K_{exp.}$) foi superior ao das normas ACI 313 (1991) e AS 3774 (1996) para os teores de umidade de 10 e 12% (b.u.) e igual para a norma ACI 313 (1991) no teor de umidade de 14% (b.u.).

Os valores encontrados para o fator K experimental ($K_{exp.}$) foram 50, 44,4 e 58,3%, do valor do fator K calculado pela norma DIN 1055 (2005), para os respectivos teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.).

4.4. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES DE FLUXO DOS PRODUTOS PULVERULENTOS

Na Tabela 15 se encontram os resultados das propriedades de fluxo dos produtos pulverulentos (farinha de mandioca e milho) na condição instantânea. As propriedades, peso específico consolidado (γ), ângulo de atrito interno (ϕ) e

ângulo efetivo de atrito interno (δ), são apresentados em seus valores máximos e mínimos com o intuito de atender à norma AS 3774 (1996) pois esta preconiza a utilização do método dos estados limites para o equacionamento dos projetos; na referida tabela se encontram, também, as propriedades de coesão (C) e o índice de fluxo (ff_c).

Tabela 15 - Propriedades de fluxo dos produtos pulverulentos

| Produtos | U | γ | | ϕ | | δ | | C | ff_c |
|------------------------|----------|--------------------|--------------------|----------|----------|----------|----------|--------------------|--------------|
| | | inf | sup | inf | sup | inf | sup | | |
| Farinha de Mandioca | 10 12 | 7042,11 7287,78 | 7152,13 7437,32 | 27 27 | 34 36 | 32 41 | 40 50 | 1456,00 2496,30 | 4,60 2,64 |
| Farinha de Milho | 10 12 | 7317,16 7237,04 | 7437,32 7355,08 | 37 41 | 41 46 | 41 48 | 62 52 | 2375,20 2108,70 | 4,24 4,97 |

U = teor de umidade (%); γ = peso específico consolidado ($N.m^{-3}$); ϕ = ângulo de atrito interno ($^{\circ}$); δ = efetivo ângulo de atrito interno ($^{\circ}$); C = coesão (Pa); ff_c = índice de fluxo; inf = limite inferior; sup = limite superior

4.4.1. Peso específico consolidado (γ)

O peso específico consolidado (γ) é de suma importância para os cálculos dos projetos de silos; sendo assim, é utilizado por todas as normas internacionais vigentes.

Os resultados médios do peso específico consolidado (γ) da farinha de mandioca (Tabela15), foram de 7097,12 e 7362,54 $N.m^{-3}$ para os teores de umidade de 10 e 12% (b.u.) respectivamente.

Os resultados do peso específico consolidado (γ) da farinha de milho (Tabela 15), apresentaram valores médios de 7377,24 e 7296,06 $N.m^{-3}$ para os teores de umidade de 10 e 12% (b.u.) respectivamente.

A fim de se comparar os valores encontrados com produtos que estivessem nas normas internacionais e se assemelhassem aos estudados, a farinha de trigo foi escolhida por estar descrita em mais de uma norma.

Pode-se observar que a farinha de mandioca e a de milho se encontram dentro da faixa estabelecida para farinha de trigo, pelas normas AS 3774 (1996) que é de 6500 a 7500 $N.m^{-3}$ e EUROCODE 1 (2006), que é de 6500 a 7000 $N.m^{-3}$, valores que correspondentes aos limites inferior e superior, respectivamente.

4.4.2. Ângulo de atrito interno (ϕ), Efetivo ângulo de atrito interno (δ) e Coesão (C)

Os valores do ângulo de atrito interno (ϕ), efetivo ângulo de atrito interno (δ) e coesão (C), para farinha de mandioca, são expressos na Tabela 15, sendo seus valores em função do teor de umidade, a 10% (b.u.): 27 a 34°, 32 a 40° e 1456,00 Pa, respectivamente; a 12% (b.u.): 27 a 36°, 41 a 50° e 2496,30 Pa, respectivamente.

Observou-se um aumento do ângulo de atrito interno (ϕ) e do efetivo ângulo de atrito interno (δ), assim como a coesão (C), em função do aumento do teor de umidade; este aumento para a coesão (C) foi de 41,67%.

Na Tabela 15 o ângulo de atrito interno (ϕ), o efetivo ângulo de atrito interno (δ) e a coesão (C), apresentaram, em função do teor de umidade, os seguintes valores para farinha de milho, a 10% (b.u.): 37 a 41°, 41 a 62° e 2375,20 Pa, respectivamente; a 12% (b.u.): 41 a 46°, 48 a 52° e 2108,70 Pa, respectivamente.

Constatou-se, ao observar os valores do ângulo de atrito interno (ϕ), e efetivo ângulo de atrito interno (δ), que os mesmos apresentaram um acréscimo em função do aumento do teor de umidade; já a coesão (C) para este produto sofreu redução de 11,2% em função do aumento do teor de umidade.

Lopes Neto et al. (2009) destacaram apenas que os valores dos ângulos de atrito interno (ϕ) e efetivos ângulos de atrito interno (δ), para a farinha de milho, para os três tempos de consolidação, são ligeiramente maiores.

Lopes Neto et al. (2009) encontraram, analisando dois tipos de ração avícola, um valor médio do ângulo de atrito de 45,1° e 39,8° para as rações A e B, respectivamente, e para o efetivo ângulo de atrito interno os valores foram 47,6° e 42,6°, respectivamente, para as rações A e B. Esses valores correspondem ao intervalo dos valores encontrados para as farinhas de mandioca e de milho.

4.4.3. Índice de Fluxo (ff_c)

Os valores do índice de fluxo (ff_c) da farinha de mandioca e de milho são apresentados na Tabela 15; esses valores médios atingiram 3,62 e 4,60 respectivamente.

Balizando-se na classificação de Jenike (1964), a farinha de mandioca apresentou um índice de fluxo coesivo e o valor do índice da farinha de milho esta em uma zona de transição entre o fluxo coesivo e o fácil.

Lopes Neto et al. (2009) encontram, estudando as propriedades dos produtos alimentícios pulverulentos para a farinha de milho com teor de umidade de 13,1% (b.u.), para um período de consolidação de 48 horas, classificação de fluxo fácil e os valores obtidos por eles para fécula de mandioca com teor de umidade de 12,6% (b.u.), foram classificados como de fluxo livre contrariando o resultado obtido por este trabalho.

Sabe-se que os pós alimentícios são complexos e de difícil caracterização em virtude de sua composição variada, da distribuição de partículas e da presença de elementos nas fases sólida, líquida e gasosa (Lopes Neto et al., 2007).

Lopes Neto et al. (2007) obtiveram, ao estudar o comportamento da escoabilidade de rações avícolas para diferentes fases, valores do índice de fluxo (ff_c), iguais a 4 para a fase inicial e engorda e 8,7 para a fase de terminação demonstrando, desta forma, a influência de componentes como gorduras e óleos, ácidos e as dimensões de partículas na variação do índice de fluxo de cada produto.

4.4.4. Ângulos de atrito com a parede (ϕ_w)

Na Figura 34 se encontram representados os valores dos ângulos de atrito com a parede (ϕ_w), inferiores e superiores, para a farinha de mandioca e de milho em função do teor de umidade de 10 e 12% (b.u.) sendo o material da parede analisado, o aço rugoso, já que este é constituinte de vários equipamentos para armazenagem, como transportadores helicoidais, e estruturas de fita

transportadoras, entre outros; também foi empregado na fabricação do equipamento para determinação das propriedades mecânicas.

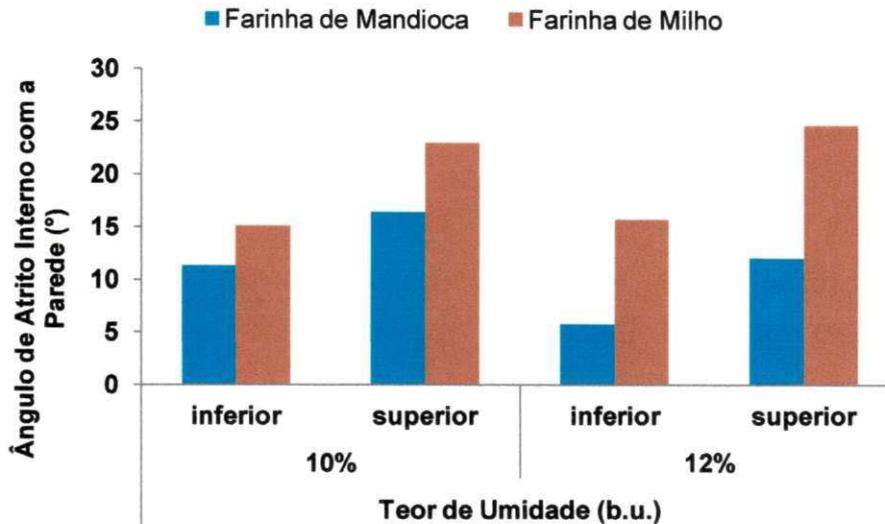


Figura 34 - Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w), de aço rugoso dos produtos pulverulentos

Analisando os produtos estudados a farinha de mandioca apresentou uma redução no valor do ângulo de atrito com a parede (ϕ_w), em relação ao aumento do teor de umidade, tanto para o limite inferior, que foi de 48,84%, quanto para o superior, de 26,63%.

Para o ângulo de atrito da farinha de milho com a parede (ϕ_w) de aço rugoso observou-se um acréscimo dos ângulos em função do aumento do teor de umidade, tanto para o limite inferior, que foi de 4,24%, quanto para o superior, que foi de 7,26%.

4.4.5. Fator K dos produtos pulverulentos

Por meio das propriedades de fluxo, da farinha de mandioca e farinha de milho determinadas pelo aparelho de Jenike (Jenike Shear Tester), foram calculados de forma indireta, os valores do fator K, utilizando-se as fórmulas propostas pelos autores Aoki (1978), Frazer (1948), Hartmann (1966) e Jaky

(1948) e pelas equações das principais normas internacionais, ACI 313 (1991), AS 3774 (1996), DIN 1055 (2005) e EUROCODE 1 (2006).

Com os dados das pressões horizontais e verticais obtidos pelo equipamento de determinação das propriedades mecânicas durante os ensaios foi possível calcular o fator K experimental ($K_{exp.}$), assim chamado e compará-lo aos valores empíricos das equações dos autores e das normas internacionais.

Os valores do fator K encontrados pelas equações dos autores e o fator K experimental ($K_{exp.}$), ilustram as Figuras 35 e 36, que correspondem às farinhas de mandioca e de milho, respectivamente.

As Figuras 37 e 38 apresentam os valores do fator K obtidos a partir das equações propostas pelas normas internacionais e também os valores do fator K experimental ($K_{exp.}$) para as farinhas de mandioca e de milho, respectivamente.

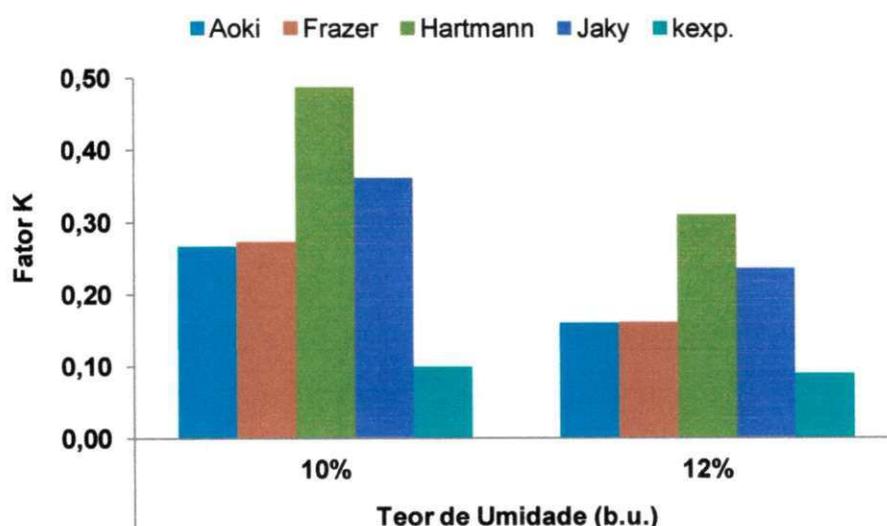


Figura 35 - Fator K para farinha de mandioca

Ao analisar os resultados apresentados na Figura 35 para a farinha de mandioca, observa-se que os valores obtidos pela formulação de Hartmann (1966) foram mais conservadores do que os valores encontrados pelas equações de Aoki (1978) e Frazer (1948), evento este observado para todos os teores de umidade.

Todos os valores encontrados nas equações dos autores supracitados na Figura 35 e para o fator K experimental ($K_{exp.}$), apresentaram redução de seus valores em relação ao aumento do teor de umidade. Este decréscimo de 36,73%

para a equação de Hartmann (1966), de 33,33% para Jaky (1948) e de 40,74% para Aoki (1978) e Frazer (1948) e para o fator K experimental ($K_{exp.}$) foi de 10%.

Os valores do fator K experimental ($K_{exp.}$) são 20,41 e 29,03%, do valor encontrado pela equação de Hartmann (1966) em relação aos teores de umidade de 10 e 12% (b.u.) respectivamente.

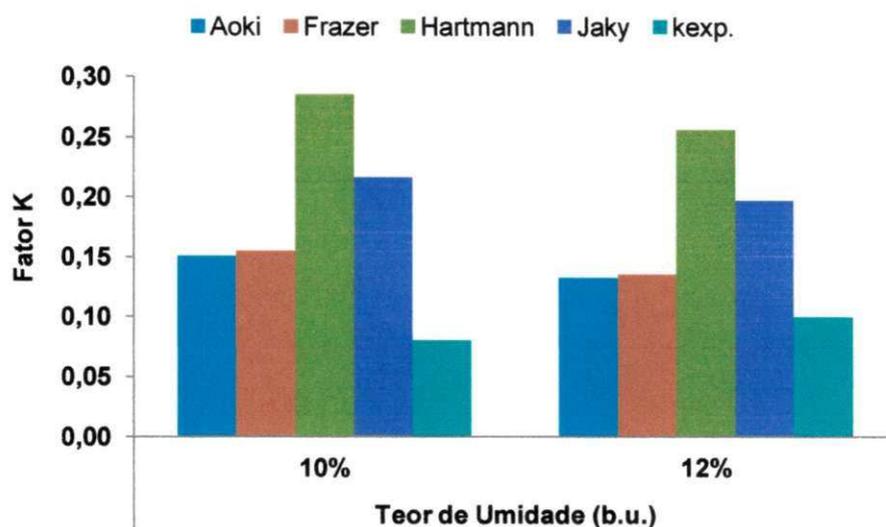


Figura 36 - Fator K para farinha de milho

Para a farinha de milho os valores do fator K ilustrados na Figura 36, obtidos pelas equações dos autores apresentaram redução de seus valores em função do aumento do teor de umidade.

Os valores obtidos pelas equações de Aoki (1978) e Frazer (1948) foram os mesmos para o teor de umidade de 10% (b.u.) sofrendo, posteriormente, uma redução dos resultados de 0,02 (ou 13,33%) para a equação de Aoki (1978) e 0,01 (ou 6,67%) para a equação de Frazer (1948); já as equações de Hartmann (1966) e Jaky (1948) apresentaram redução de 10,35% e 9,09%, respectivamente, em virtude do aumento do teor de umidade.

O fator K experimental ($K_{exp.}$) apresentou resultado contrário ao comportamento apresentado pelas equações dos autores; este sofreu um aumento de 25% com o acréscimo de 2% no teor de umidade do produto.

Comparando os valores experimentais com os de Hartmann (1966), observa-se que os experimentais são inferiores, 72,41 e 61,54%, respectivamente, aos teores de umidade de 10 e 12% (b.u.).

Nascimento & Calil Junior 2009, encontraram, analisando a ração de frango com teor de umidade média de 13,57% (b.u.), valores aproximados aos desta pesquisa para o fator K calculado pelas equações de 0,29, 0,39 e 0,20, respectivamente para os autores Jaky (1948), Hartmann (1966) e Frazer (1948).

Para o fator K experimental da ração de frango os autores obtiveram um valor de 0,29 para uma superfície lisa sendo este valor superior aos obtidos para as farinhas de mandioca e de milho, para todos os teores de umidade estudados neste trabalho.

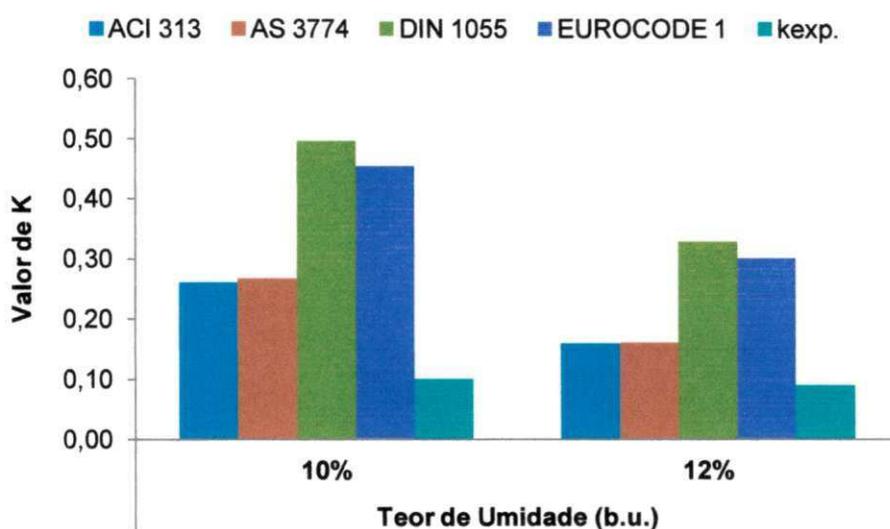


Figura 37 - Fator K para farinha de mandioca

A Figura 37 ilustra os valores do fator K obtidos para a farinha de mandioca a partir das equações das normas internacionais e também os valores do fator K experimental ($K_{exp.}$); nota-se que os valores diminuem com o aumento do teor de umidade.

A equação proposta pela norma DIN 1055 (2005) demonstrou ser a mais conservadora das normas, seguida da norma EUROCODE 1 (2006), para todos os teores de umidade.

O fator K experimental ($K_{exp.}$), apresentou o menor resultado em relação aos valores obtidos pelas equações das normas; seus valores, comparados aos da norma DIN 1055 (2005), foram de 20 e 27,3%, respectivamente, aos teores de umidades de 10 e 12% (b.u.) do valor obtido empiricamente.

Com o intuito de comparar os valores obtidos na pesquisa com os preconizados nas normas internacionais, apenas os valores correspondentes ao teor de umidade de 10% se enquadram nos limites propostos pelas normas DIN 1055 (2005) que variam de 0,40 a 0,65 e EUROCODE 1 (2006) que oscila de 0,40 a 0,55.

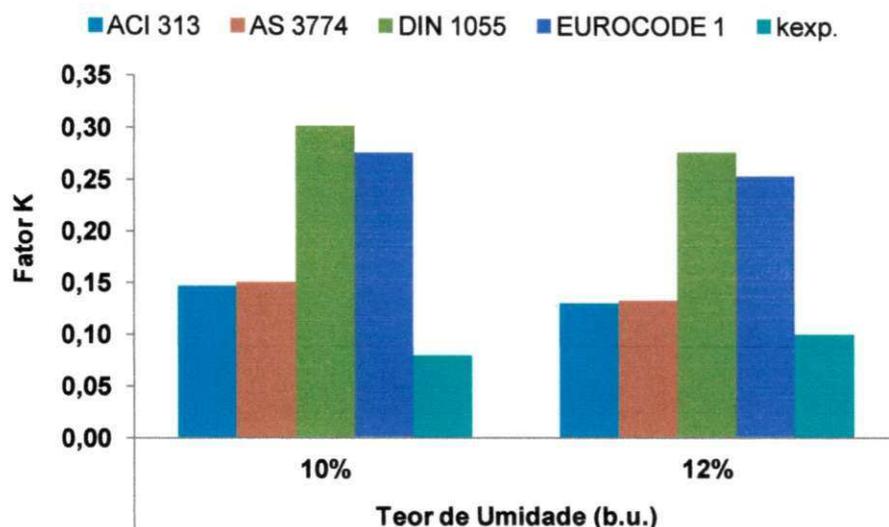


Figura 38 - Fator K para farinha de milho

Os valores do fator K calculados pelas normas internacionais para a farinha de milho ilustrados na Figura 38, apresentaram redução dos valores devido ao aumento de 2% no teor de umidade; em contrapartida, o valor do fator K experimental ($K_{exp.}$), apresentou elevação de seu valor de 0,08 para 0,10 com o aumento do teor de umidade.

Os resultados se mostraram iguais para as normas ACI 313 (1991) e AS 3774 (1996), para o teor de umidade de 10 e 12% (b.u.). A norma DIN 1055 (2005) que apresenta o maior valor entre todas as normas estudadas, é 73,33 e 64,29% maior, respectivamente, aos teores de umidade de 10 e 12% (b.u.), em relação aos valores obtidos pelo fator K experimental ($K_{exp.}$).

Nenhum valor encontrado se enquadra nos limites propostos pelas normas em estudo.

4.5. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS GRÃOS

São apresentados, nos tópicos abaixo, os resultados das propriedades mecânicas assim como a discussão dos produtos granulares, arroz, feijão e milho triturado relacionando-os aos teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.) e para as quatro cargas de compressão (5, 10, 15 e 20 kN).

Uma das propriedades mecânicas analisadas é o coeficiente de Poisson que foi calculado por meio da Equação 11, para a etapa de carregamento (v^*), pela Equação 19, para a etapa de descarregamento (v) e pela Equação 21 para a etapa de descarregamento utilizando-se os dados experimentais ($v_{exp.}$), obtidos pelo equipamento de determinação das propriedades mecânicas.

Para o cálculo do módulo de elasticidade calculado (E) e o módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$), os dados foram obtidos na segunda etapa do ensaio (descarregamento) do primeiro estágio (AB), como ilustra a Figura 14.

Os cálculos para o resultado do módulo de elasticidade calculado (E) foram obtidos a partir das Equações 17, 18 e 19; já para a obtenção dos resultados do módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$), utilizaram-se gráficos de tensão-deformação extraíndo-se, deles, a informação da fração linear (retilínea) em que se caracteriza a deformação elástica.

Obteve-se o ângulo de dilatação mediante a utilização da Equação 25.

Para análise, comparação e aprovação dos ensaios, os valores médios obtidos da tensão vertical (σ_y) e da deformação vertical (ϵ_y), de cada ensaio, foram plotados visualizando-se o percurso completo do ensaio (carregamento e descarregamento) conforme ilustrado na Figura 14.

4.5.1. Arroz

4.5.1.1. Coeficiente de Poisson dos grãos de arroz

A Figura 39 apresenta os valores do coeficiente de Poisson dos grãos de arroz para a etapa de carregamento (v^*), para a etapa de descarregamento (v) e

para a etapa de descarregamento utilizando-se os dados experimentais (v_{exp}), para quatro cargas de compressão em relação aos teores de umidade.

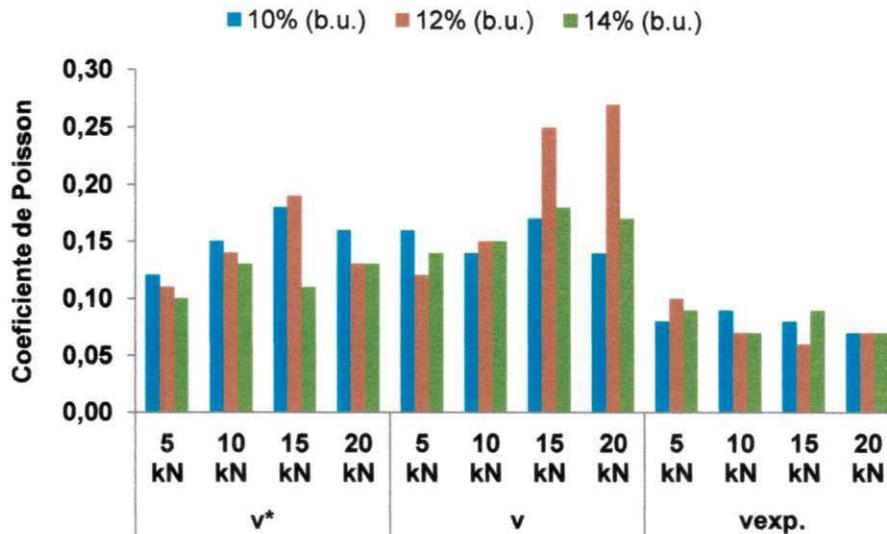


Figura 39 - Coeficiente de Poisson para os grãos de arroz

A Figura 39 ilustra os resultados obtidos para os coeficientes de Poisson calculados para a etapa de carregamento (v^*) e descarregamento (v) e o experimental (v_{exp}), podendo-se observar que os valores para o teor de umidade de 10% (b.u.) apresentaram aumento dos valores até a carga de 15 kN na etapa de carregamento; já para a etapa de descarregamento observa-se a oscilação dos valores no decorrer do aumento das cargas e para os valores experimentais ocorreu um decréscimo gradual dos valores, a partir da carga de 10 kN.

Para o teor de 12% (b.u.) o coeficiente Poisson calculado (v^*), para o carregamento apresentou o mesmo comportamento exibido pelos resultados do teor de umidade 10% (b.u.) para a mesma etapa.

O coeficiente de Poisson calculado (v) obteve aumento com o acréscimo das cargas para a etapa de descarregamento, alcançando o maior valor entre os teores de umidade.

O coeficiente de Poisson experimental (v_{exp}), apresentou um decréscimo de seus valores até a carga de 15 kN.

O teor de umidade de 14% (b.u.) apresentou, para o coeficiente de Poisson calculado (v^*) na etapa de carregamento, uma oscilação dos resultados; para o

coeficiente de Poisson calculado (ν), com os dados da etapa de descarregamento, constatou-se aumento para o coeficiente com o emprego da carga de compressão; o coeficiente de Poisson experimental ($\nu_{exp.}$), apresentou uma oscilação em seus resultados variando do maior valor para as cargas de 5 e 15 kN e o menor valor para as cargas de 10 e 20 kN.

O teor de umidade de 10% (b.u.) apresentou aumento do coeficiente de Poisson calculado (ν^*), para a etapa de carregamento, de 0,12 (5 kN) para 0,18 (15 kN) com redução de 0,02 para carga de 20 kN.

O coeficiente de Poisson calculado (ν) para a etapa de descarregamento demonstrou possuir uma oscilação em seus resultados, observando-se que o menor valor (0,14), foi encontrado para duas cargas de 10 e 20 kN e o maior valor (0,17) foi sinalizado para a carga de 15 kN.

O coeficiente de Poisson experimental ($\nu_{exp.}$), apresentou decréscimo gradual a partir da carga de 10 kN, sendo o maior valor de 0,09 (10 kN) e o menor valor de 0,07 (20 kN).

Os resultados do teor de umidade de 12% (b.u.) para o coeficiente de Poisson calculado (ν^*), para a etapa de carregamento, apresentaram um aumento partindo do valor de 0,11 referente à menor carga (5 kN) até o valor de 0,19 para a carga de 15 kN e para a carga superior de 20 kN apresentou redução de 31,58% (0,06).

O coeficiente de Poisson calculado (ν) na etapa de descarregamento apresentou, por outro lado, um aumento expressivo em relação aos outros teores de umidade para mesma etapa, com acréscimo dos resultados com o aumento das cargas, em que o menor valor de 0,12 é referenciado à carga de 5 kN e o maior valor 0,27 foi sinalizado para a carga de 20 kN, um aumento de 55,56% (0,15); o que mais chamou a atenção neste caso, foi o aumento de 40% do valor da carga de 10 kN para a carga de 15 kN em comparação com o aumento para as outras cargas.

Para o coeficiente de Poisson experimental ($\nu_{exp.}$) os resultados apresentaram uma oscilação de forma geral mas o maior valor (0,10) foi obtido para a carga de 5 kN e o menor (0,06) para as cargas de 15 kN, sinalizando um decréscimo de 40%.

Para o teor de umidade de 14% (b.u.) o coeficiente de Poisson calculado (ν^*) para o carregamento, apresentou oscilações dos resultados em que o valor mínimo foi de 0,10 para a carga de 5 kN e o valor máximo de 0,13, para as cargas de 10 e 20 kN.

O coeficiente de Poisson calculado (ν) com os dados da etapa de descarregamento, apresentou aumento do coeficiente com o acréscimo da carga em que o menor valor de 0,14 foi obtido pela carga de 5 kN e o maior valor 0,18 pela carga de 15 kN; apesar deste aumento, houve redução do coeficiente para 0,01 obtida pela carga máxima estudada (20 kN).

O coeficiente de Poisson experimental ($\nu_{exp.}$) passou por uma oscilação em que o maior valor (0,09), foi atribuído à carga de 5 e 15 kN e o menor (0,07), às cargas de 10 e 20 kN, sendo o menor valor obtido para os outros teores de umidade.

Molenda & Stasiaki (2002) identificaram, estudado o comportamento das propriedades elásticas com uma aplicação de carga uniaxial de 100 kPa para de cinco grãos (cevada, aveia, trigo centeio e semente de canola) um valor máximo para o coeficiente de Poisson (ν) de 0,22 obtido para os grãos de trigo com teor de umidade de 10% (b.u.) e para o mesmo teor de umidade o arroz apresentou um intervalo de 0,14 a 0,17. O valor mínimo (0,15) encontrado pelos autores foi para os grãos de cevada com teor de umidade de 15% (b.u.), enquanto o encontrado para os grãos de arroz para o teor de umidade de 14% (b.u.) foi de 0,14.

Para justificar seus resultados, Sawicki e OEwidziński (1998) apud Molenda & Stasiaki (2002) encontraram, para o coeficiente de Poisson dos grãos de trigo secos valor máximo igual (0,27), obtido para os grãos de arroz e, para o teor de umidade, 12%.

A norma polonesa, Polonês Standard - PN-89/B-03262 (1989) recomenda a utilização de um coeficiente de Poisson de 0,4 para os grãos com a finalidade de concepção de projetos.

4.5.1.2. Módulo de elasticidade dos grãos de arroz

Os valores do módulo de elasticidade calculados (E) e experimental ($E_{exp.}$), são apresentados na Figura 40, para as quatro cargas de compressão em relação aos teores de umidade.

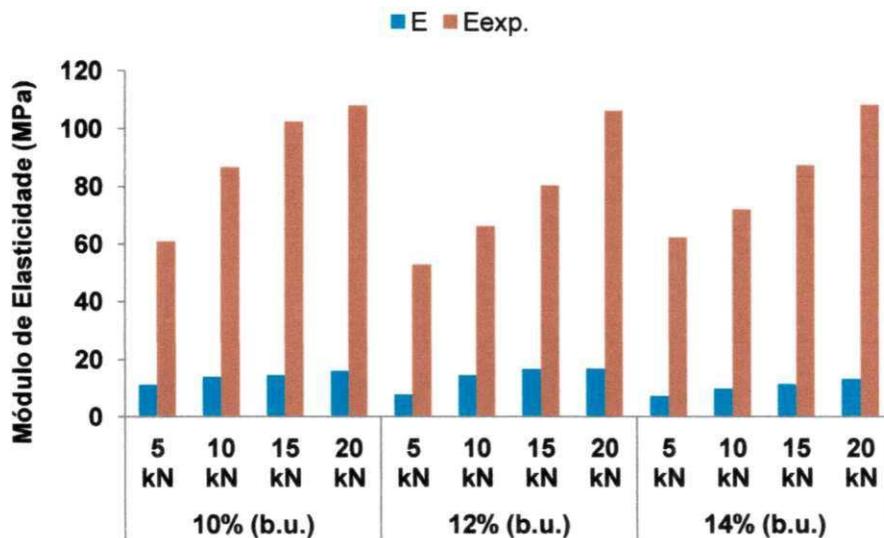


Figura 40 - Módulo de elasticidade para grãos de arroz

A Figura 40 ilustra os resultados obtidos para os módulos de elasticidade calculado (E) e experimental ($E_{exp.}$).

Os módulos de elasticidade calculados (E) para todos os teores de umidade são inferiores aos experimentais ($E_{exp.}$). Notou-se, também, que a diferença entre os valores dos módulos de elasticidade calculado (E), e experimental ($E_{exp.}$), avaliando-se apenas os resultados obtidos para a carga de 20 kN, chegam a 85,16, 84,13 e 87,82%, respectivamente, para os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.).

O módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$), do teor de umidade de 10% apresentou valores superiores aos outros teores de umidade. Os módulos de elasticidade calculado (E) e experimental ($E_{exp.}$), apresentaram comportamento semelhante para todos os teores de umidade em que os valores obtidos aumentaram com o emprego do aumento da carga.

Em análise dos resultados do teor de umidade de 10% (b.u.) o módulo de elasticidade calculado (E), apresentou aumento dos valores com o acréscimo da

carga, sendo o menor valor de 11 MPa para a carga de 5 kN e o maior 16,05 MPa para a carga de 20 kN.

O módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$) apresentou, por sua vez, valores superiores aos calculados, além de, aumento com o acréscimo da carga, sinalizado para o menor valor 60,85 MPa para a carga de 5 kN e o maior valor 108,18 MPa para a carga de 20 kN. O valor obtido pela carga de 15 kN foi muito próximo ao alcançado pela carga superior apenas com uma diferença de 5,21% (5,64 MPa).

Para o teor de umidade de 12% (b.u.) o módulo de elasticidade calculado (E), apresentou comportamento semelhante ao do teor de umidade de 10% (b.u.) com valor mínimo de 7,91 MPa, para a carga de 5 kN e máximo de 16,92 MPa, para a carga de 20 kN. Observou-se também, para os dados calculados, um salto de 45,07% da carga de 5 kN para a de 10 kN e que os valores das cargas de 15 e 20 kN possuem uma diferença 0,02 MPa, sendo praticamente constantes seus resultados.

Já o módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$), apresentou conformidade em seu comportamento com aumento dos valores sempre que lhe acrescia nova carga, em que o menor valor encontrado foi de 52,85 MPa e o maior, de 106,62 MPa, para as cargas de 5 e 20 kN, respectivamente, com uma diferença entre os valores extremos de 50,43%, culminando em um salto entre os valores de 15 e 20 kN, de 24,43%.

O teor de umidade de 14% (b.u.) apresentou os seguintes resultados para o módulo de elasticidade calculado (E), cujos valores foram de 7,24 e 13,22 MPa, respectivamente, para as cargas de 5 e 20 kN, sendo a diferença entre esses valores de 45,23%.

Para o módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$) o menor valor encontrado foi de 62,29 MPa para a carga de 5 kN e o maior valor foi de 108,57 MPa, sendo a diferença entre eles de 42,63%. Constatou-se ainda, para os resultados experimentais, que este módulo apresentou um salto entre os valores de 15 e 20 kN de 19,22%.

Em seu experimento, Stasiak et al. (2007), se utilizaram de um método acústico para determinação do módulo de elasticidade de seis produtos granulares e identificaram que esses produtos apresentaram aumento dos valores em relação ao aumento da carga e sua diminuição com o acréscimo do teor de

umidade, fato observado nesta pesquisa para os grãos de arroz e para os grãos de feijão e de milho triturado.

Os autores supracitados obtiveram um intervalo maior (20 a 120 MPa) do módulo de elasticidade encontrado para os grãos de trigo a um teor de umidade de 10% (b.u.) enquanto a menor variação do módulo com a carga imposta foi observada para os grãos de aveia, aproximadamente igual a 50 MPa; esses valores podem ser comparados aos encontrados experimentalmente neste trabalho.

Eles também identificaram que os grãos de trigo apresentaram aumento rápido para o módulo de elasticidade após ser aplicada uma carga de 60 kPa, comportamento, este diferente para os outros produtos.

Para justificar tal fato, os autores explicam que o comportamento dos grãos de trigo se deve à forma relativamente regular e à superfície lisa dos grãos que permitem um aumento da superfície de contato facilitando a transmissão da onda acústica.

4.5.1.3. Ângulo de dilatância dos grãos de arroz

A Figura 41 ilustra os valores do ângulo de dilatância (ψ) dos grãos de arroz para as quatro cargas de compressão em relação aos teores de umidade estudados.

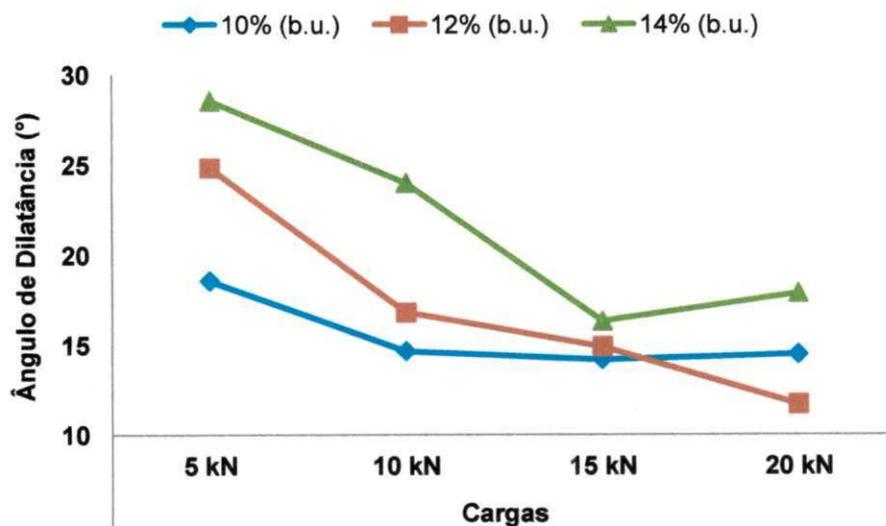


Figura 41 - Ângulo de dilatância para grãos de arroz

Os dados obtidos dos ângulos de dilatância para os grãos de arroz apresentaram tendência semelhante até a carga de 15 kN, para todos os teores de umidade.

O teor de umidade de 10% (b.u.) apresentou uma redução abrupta de 3,91° (26,67%), de 5 kN para 10 kN, mantendo-se constante para as cargas de 15 e 20 kN.

Os valores dos ângulos de dilatância obtidos para o teor de umidade de 12% (b.u.) apresentaram tendência de queda com o maior valor (24,83°) a 5 kN e o menor valor (11,69°) a 20 kN, uma diferença de 52,92%; ainda para este teor de umidade 12% (b.u.) observa-se que o valor obtido para 20 kN é menor que o do teor de umidade de 10% (b.u.), para a mesma carga.

Outra observação foi quanto ao teor de umidade de 14% que apresentou redução do ângulo de dilatância de 5 kN cujo maior valor foi de 28,54°; para o de menor valor obtido de 16,32° referente à carga de 15 kN, esta diminuição foi de 74,88%, que, em seguida, apresentou um aumento para a carga de 20 kN de 1,57° (9,62%).

Ayuga (2001b) apud Guaita et al. (2003), relata que o ângulo de dilatância é um dos dados necessários para se usar o critério de elastro-plástico de Drucker-Prager e para as definições das regras de fluxo que determinam a direção da plasticidade.

Os grãos de arroz estão enquadrados na classificação do autor, que diz que quando o ângulo de dilatância (ψ) é menor que o ângulo de atrito interno (ϕ) haverá menos expansão volumétrica.

4.5.1.4. Curvas características dos grãos de arroz

Os dados médios de tensão (σ_y) versus deformação (ϵ_y), dos ensaios mecânicos dos grãos de arroz foram plotados nas Figuras 42, 43 e 44, e expressam seu o comportamento, para os quatro níveis de carga e para os respectivos teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.).

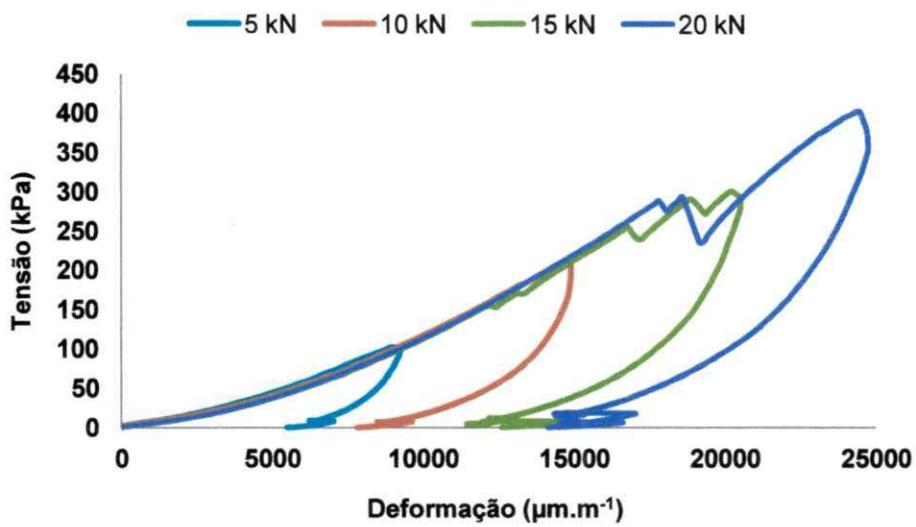


Figura 42 - Curvas características para grãos de arroz a 10% (b.u.)

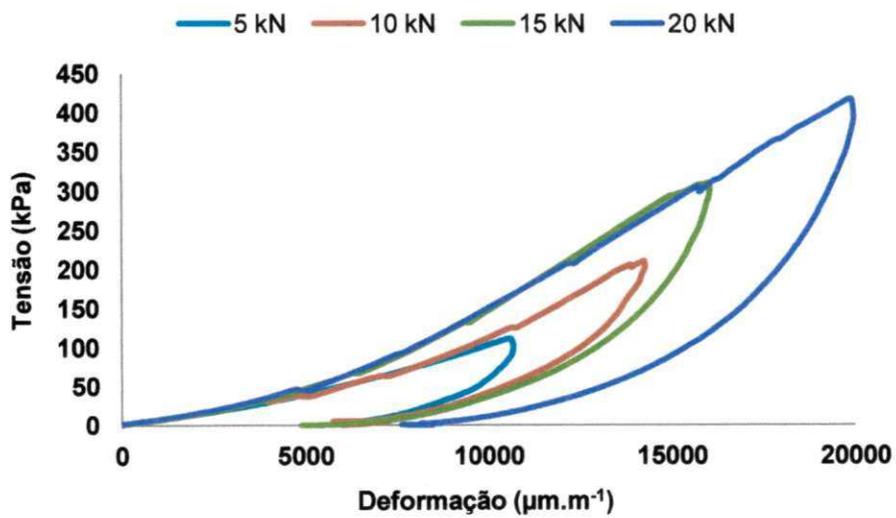


Figura 43 - Curvas características para grãos de arroz a 12% (b.u.)

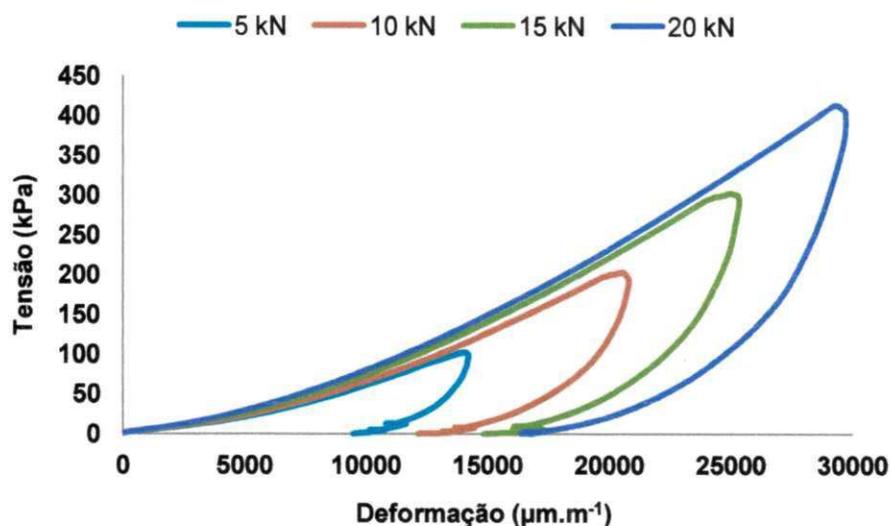


Figura 44 - Curvas características para grãos de arroz a 14% (b.u.)

A Figura 42 ilustra as curvas traçadas pelos dados obtidos no ensaio de compressão; nota-se que as curvas mantiveram um comportamento similar ao da primeira etapa do ensaio (carregamento), tendo seus picos de tensão versus deformação separados devido ao acréscimo das cargas. Observa-se também uma descontinuidade, principalmente nas curvas de 15 e 20 kN, devida à reorganização do produto no interior do equipamento de determinação das propriedades mecânicas haja vista que o produto tem formato característico oblongo.

As curvas caracterizadas na Figura 43 apresentam duas sobreposições na etapa inicial do ensaio onde se caracteriza o carregamento; uma delas é referenciada para as cargas de 5 e 10 kN e a outra para as cargas de 15 e 20 kN; observa-se também que as curvas apresentaram efeito de sobe e desce, como visto para as curvas do teor de umidade de 10% (b.u.) da Figura 40.

Conforme a Figura 44, as curvas mantiveram coerência no decorrer do ensaio apesar de não apresentarem uma sobreposição no decorrer da primeira etapa do ensaio (carregamento).

As curvas das Figuras 42, 43 e 44 apresentam, para todos os ensaios dos teores de umidade e cargas impostas, um comportamento previsto.

4.5.2. Feijão

4.5.2.1. Coeficiente de Poisson dos grãos de feijão

Os valores do coeficiente de Poisson dos grãos de feijão estão ilustrados na Figura 45, para a etapa de carregamento (v^*), para a etapa de descarregamento (v), e para a etapa de descarregamento utilizando-se os dados experimentais (v_{exp}), para quatro cargas de compressão em relação aos teores de umidade.

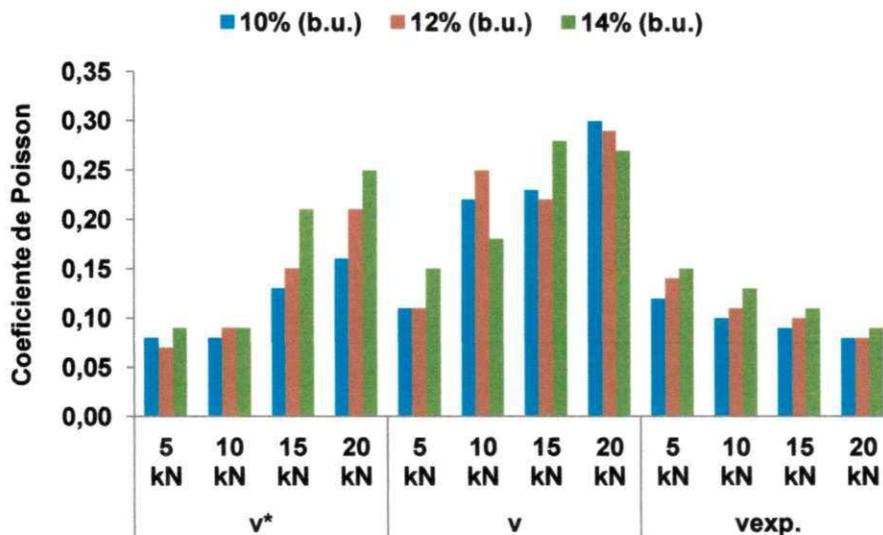


Figura 45 - Coeficiente de Poisson para grãos de feijão

Analisando a Figura 45 observa-se que os coeficientes de Poisson calculados, carregamento (v^*) e descarregamento (v), apresentaram comportamento semelhante para os três teores de umidade em que os valores aumentaram com o acréscimo de carga.

Já o coeficiente de Poisson experimental (v_{exp}) mostrou-se inverso aos coeficientes de Poisson calculados com valores maiores para a menor carga (5 kN) e menor valor para a carga maior (20 kN), também em comparação com os coeficientes calculados apresentaram valores muito baixos.

Para o teor de umidade de 10% (b.u.) o coeficiente de Poisson calculado (v^*) para a etapa de carregamento mostrou-se constante (0,08) para as cargas iniciais alcançando o valor de 0,16 para a carga de 20 kN, sinalizando um acréscimo de 50%.

Para o coeficiente de Poisson calculado (v), para a etapa de descarregamento, o panorama mudou, pois o menor valor alcançado nesta etapa foi de 0,11 para a carga de 5 kN; logo após, apresentou um crescimento de 50% para carga de 10 kN alcançando, assim, o valor máximo de 0,30 para a carga de 20 kN, sendo a diferença entre o menor valor e o maior, de 63,33%.

Já o coeficiente de Poisson experimental ($v_{exp.}$), apresentou, para a carga de 5 kN, o seu maior valor de 0,12, sofrendo uma redução com o aumento da carga até alcançar o menor valor de 0,08.

Inicialmente, os resultados para o teor de umidade de 12% (b.u.) foram calculados para o coeficiente de Poisson calculado (v^*), para o carregamento o menor dos valores (0,07) entre os teores de umidade analisados apresentou crescimento abrupto da carga de 10 kN para a de 15 kN com aumento de 40% chegando ao valor máximo de 0,21 para a carga de 20 kN.

O coeficiente de Poisson calculado (v) para a etapa de descarregamento apresentou valor igual (0,11), ao do teor de umidade de 10% (b.u.) para a menor carga; em seguida, ocorreu um crescimento de 56% até a carga de 10 kN alcançando, posteriormente, o valor máximo de 0,29 para a carga de 20 kN; a diferença de valores para essa etapa entre o menor e o maior valor, foi de 62,07%.

Já o coeficiente de Poisson experimental ($v_{exp.}$), apresentou uma redução de 0,14 para a carga de 5 kN a 0,08 para a carga de 20 kN, uma diferença de 42,86%.

Quanto ao teor de umidade de 14% o coeficiente de Poisson (v^*), para situação de carregamento apresentou valores constantes (0,09) para as duas primeiras cargas, elevando-se a 0,21 para a carga de 15 kN sendo este um aumento de 57,14%; já o valor máximo encontrado foi de 0,25 para a carga de 20 kN, sendo a diferença entre o menor e o maior valor, de 64%.

O coeficiente de Poisson calculado (v) com os dados de descarregamento para este mesmo teor de umidade, apresentou valor mínimo de 0,15 e máximo de

0,28, respectivamente, para as cargas de 5 e 15 kN, sendo esta diferença de 46,43%.

Por outro lado, o coeficiente de Poisson experimental ($v_{exp.}$) apresentou seu maior valor (0,15) para a menor carga (5 kN) e seu menor valor para a maior carga (20 kN), quantificando, então, uma diferença de 0,06 (40%).

Stasiak et al. (2001) constataram, trabalhando com grãos de canola para quatro teores de umidade e utilizando uma pressão de 100 kPa, que os valores das constantes elásticas obtidas variaram dependendo da umidade e diminuíram com seu aumento contrariando os resultados obtidos neste trabalho.

Esses autores encontraram, para o coeficiente de Poisson calculado (v^*), para a etapa de carregamento, os valores de 0,27, 0,26 e 0,23, respectivamente para os teores de umidade de 9, 12 e 15% (b.u.), sendo valores aproximados encontrados para o feijão para os teores de umidade de 12 e 14% (b.u.).

Para o coeficiente de Poisson calculado para a etapa de descarregamento, os valores são proporcionalmente invertidos aos encontrados neste trabalho sendo de 0,17, 0,16 e 0,10, respectivamente, para os teores de umidade de 9, 12 e 15% (b.u.) enquanto os encontrados na pesquisa foram de 0,11, 0,11 e 0,15, respectivamente, para os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.) para a carga de 5 kN (66 kPa).

4.5.2.2. Módulo de elasticidade dos grãos de feijão

Os resultados dos módulos de elasticidade calculado (E) e experimental ($E_{exp.}$) para os grãos de feijão, são apresentados na Figura 46 para as quatro cargas de compressão em relação aos teores de umidade estudados.

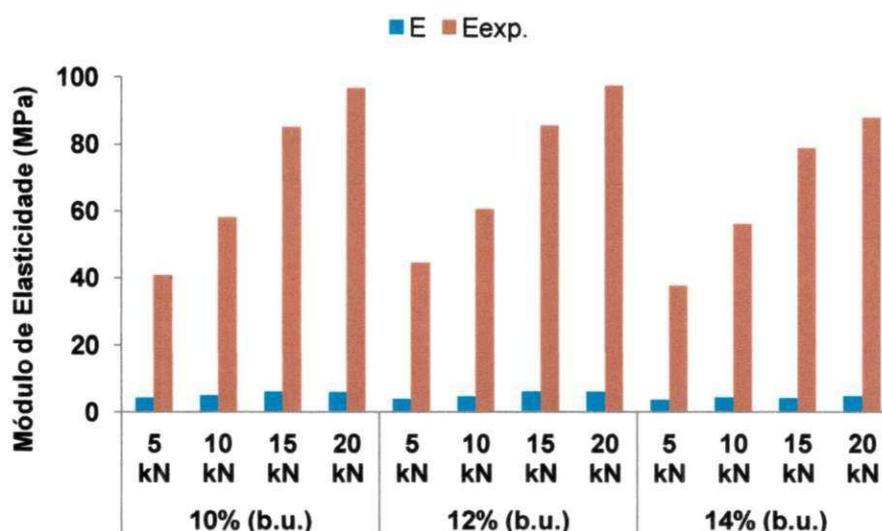


Figura 46 - Módulo de elasticidade para o grão de feijão

Analisando a Figura 46 que ilustra os resultados dos módulos de elasticidade calculado (E) e experimental ($E_{exp.}$), observa-se uma diferença expressiva entre eles; calculando-se apenas os resultados para a carga de 20 kN chega-se a 93,88, 93,67 e 94,45%, respectivamente, para os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.).

Para o teor de umidade de 10% (b.u.) o módulo de elasticidade calculado (E), apresenta um aumento dos valores com o acréscimo da carga até 15 kN, sendo o menor valor 4,2 MPa para a carga de 5 kN e o maior 6,09 MPa para a carga de 15 kN.

Os resultados dos módulos de elasticidade experimental ($E_{exp.}$), obtiveram um aumento com o acréscimo das cargas sendo o menor valor de 40,85 MPa obtido para a carga de 5 kN e o maior valor de 96,85 MPa, para a carga 20 kN representando, assim, um aumento de 57,82% entre as duas cargas.

O teor de umidade de 12% (b.u.), apresentou, por sua vez, para o módulo de elasticidade calculado (E), o valor mínimo de 3,86 MPa para a carga de 5 kN e um máximo de 6,2 MPa para a carga de 20 kN.

O módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$), tal como o calculado (E), apresentou aumento com acréscimo da carga sendo o menor valor de 37,81 MPa obtido para a carga de 5 kN e o maior de 98 MPa para a carga de 20 kN, um acréscimo de 54,37%.

Para o teor de umidade de 14% o módulo de elasticidade calculado (E), apresentou o valor mínimo de 3,66 MPa para a carga de 5 kN e um máximo de 4,89 MPa para a carga de 20 kN.

O módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$), tal como para os outros teores de umidade, apresentou aumento em relação ao acréscimo de carga, sendo a diferença entre o menor valor (37,81 MPa) e o maior (88,17 MPa), respectivamente para as cargas, de 5 e 20 kN, de 57,12%.

Stepniewski & Szot (1995) e Stepniewski (1997) apud Stasiak et al. (2001) estudaram individualmente o módulo de elasticidade do grão de canola, o qual foi comprimido entre duas placas paralelas e obtiveram, para o teor de umidade de 15%, um valor para o módulo de elasticidade de 6 MPa e para 6% de umidade do produto encontraram 27 MPa, chegando à conclusão de que a diferença entre o valor do módulo de elasticidade para uma única semente e para depósito de grãos, é proveniente da influência da composição do material da parede e da interação entre as sementes.

Stasiak et al. (2001) concluíram, ao estudar o módulo de elasticidade (E) para canola e utilizando uma carga de compressão de 10 kPa, que os valores decresciam com o aumento do teor de umidade encontrando um valor de 8,7 MPa para o teor de umidade de 9% (b.u.) e 6,6 MPa para o teor de umidade de 15% (b.u.); já os valores dos módulos de elasticidade obtidos para os grãos de feijão foram 30, 13,66 e 25,9% inferiores aos encontrados pelos autores para os respectivos teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.).

4.5.2.3. Ângulo de dilatância dos grãos de feijão

Os resultados do ângulo de dilatância para os grãos de feijão nas quatro cargas de compressão em função dos teores de umidade, são apresentados na Figura 47.

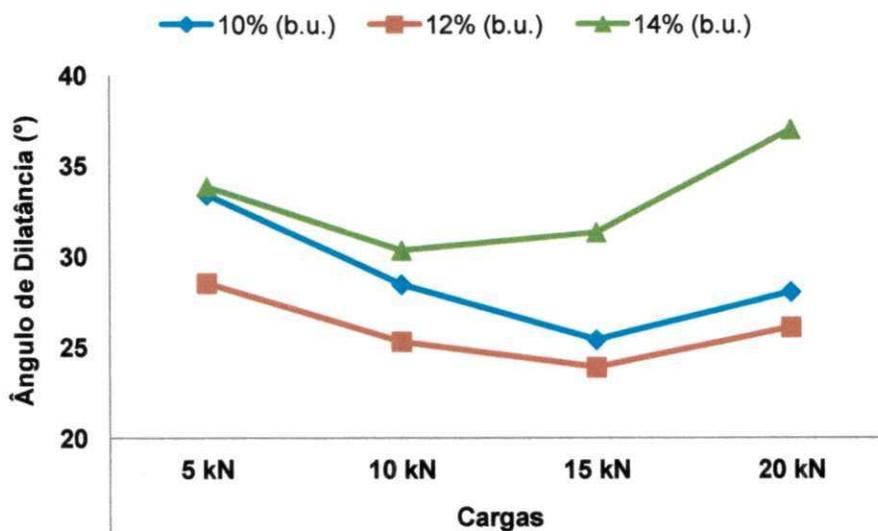


Figura 47 - Ângulo de dilatância para grãos de feijão

Analisando os ângulos de dilatância dos grãos de feijão observa-se que os valores encontrados para o teor de umidade de 10% (b.u.) foram intermediários e, superiores ao teor de umidade de 12% (b.u.) e inferiores ao teor de 14% (b.u.).

Os dados dos teores de 10 e 12% (b.u.) obtiveram comportamento semelhante em que os ângulos de dilatância decaíram 31,46 e 19,41%, respectivamente, com o aumento da carga até 15 kN e em seguida apresentaram aumento para carga de 20 kN. Este aumento em relação ao menor valor da carga de 15 kN (25,4 e 23,9°, respectivamente) para os dois teores de umidade de 10 e 12% (b.u.) foi de 10,35 e 9,16%, respectivamente.

Já o teor de umidade de 14% (b.u.), para as duas primeiras cargas (5 e 10 kN), apresentou diminuição dos valores dos ângulos de dilatância acompanhando os outros dois teores de umidade e, para as duas últimas cargas (15 e 20 kN), os valores dos ângulos demonstraram aumento de 3,26 e 21,89%, respectivamente, para as cargas de 15 e 20 kN, em relação ao menor ângulo obtido (30,33°) para carga de 10 kN.

4.5.2.4. Curvas características dos grãos de feijão

As curvas plotadas para os grãos de feijão com os valores médios de tensão (σ_y) versus deformação (ϵ_y), para cada ensaio, estão agrupadas nas

Figuras 48, 49 e 50, reúnem informação de todo o percurso do ensaio para os quatro níveis de carga e para os respectivos teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.).

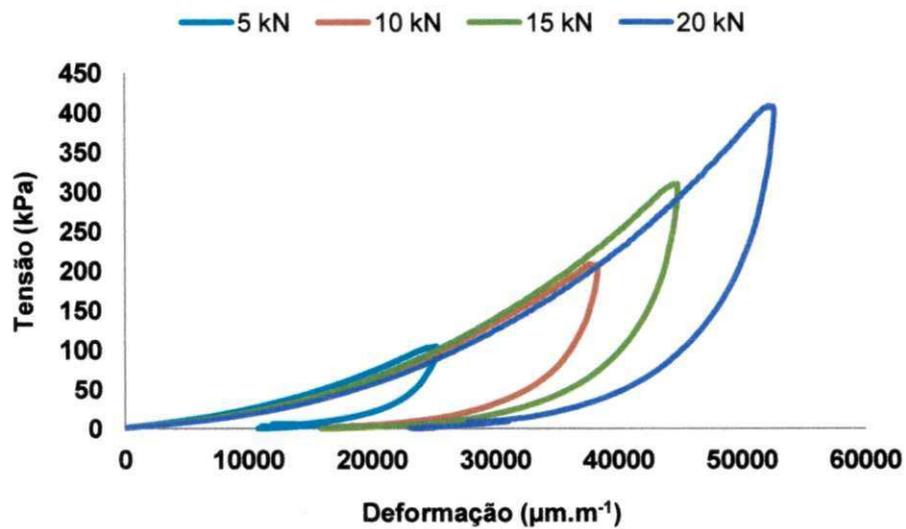


Figura 48 - Curvas características para grãos de feijão a 10% (b.u.)

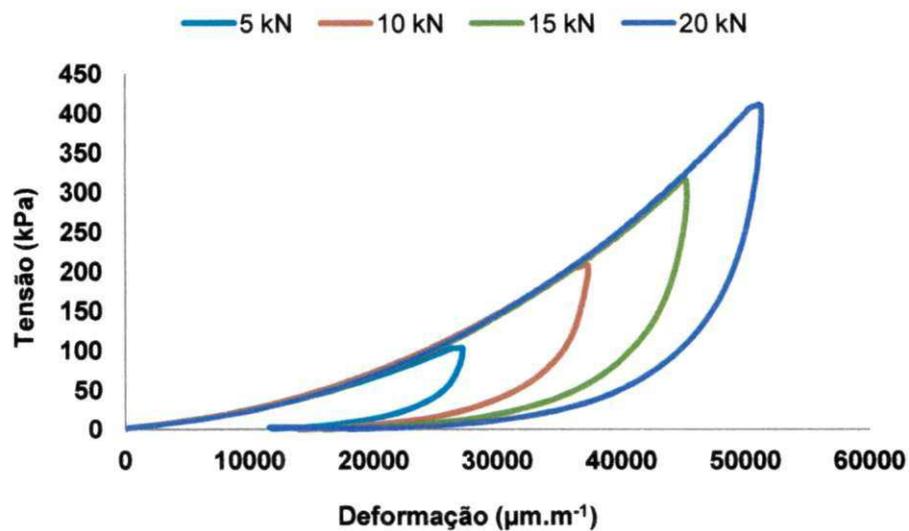


Figura 49 - Curvas características para grãos de feijão a 12% (b.u.)

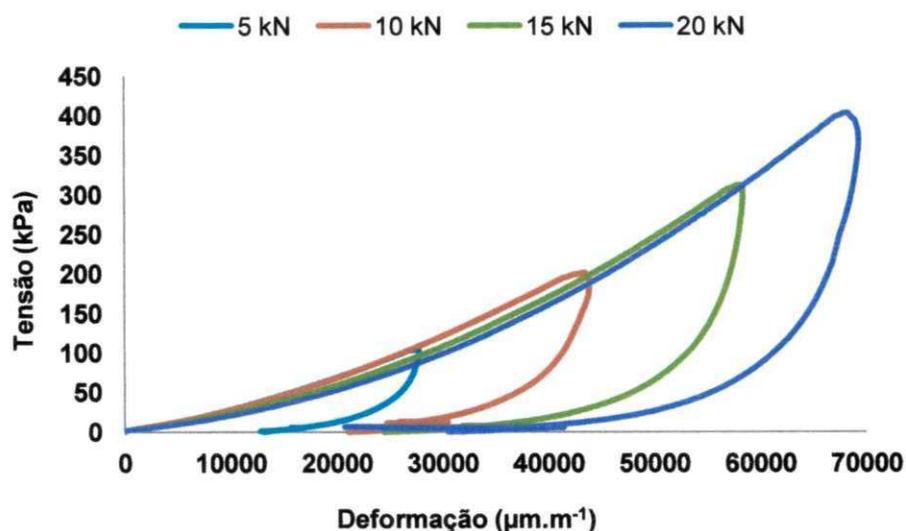


Figura 50 - Curvas características para grãos de feijão a 14% (b.u.)

A Figura 48, que representa as curvas obtidas para o teor de umidade de 10% (b.u.) apresenta, na primeira etapa (carregamento) duas sobreposições em relação às outras curvas, observadas nas curvas de 5 e 15 kN.

Para o teor de umidade de 12% (b.u.), a Figura 49 é a que representa o comportamento das curvas para este ensaio, observando-se que todas as curvas se sobrepõem para a primeira etapa, mantendo as devidas amplitudes em relação à carga imposta; já o teor de umidade de 14% (b.u.) é representado pela Figura 50 que ilustra as curvas de 5 e 10 kN sobrepostas às outras duas (15 e 20 kN) na etapa de carregamento.

Todas as curvas para todos os teores de umidade apresentaram o comportamento esperado.

4.5.3. Milho Triturado

4.5.3.1. Coeficiente de Poisson dos grãos de milho triturado

A Figura 51 ilustra os valores do coeficiente de Poisson dos grãos de milho triturado para a etapa de carregamento (ν^*), para a etapa de descarregamento

(ν), e para a etapa de descarregamento utilizando-se os dados experimentais ($\nu_{exp.}$), para quatro cargas de compressão em relação aos teores de umidade.

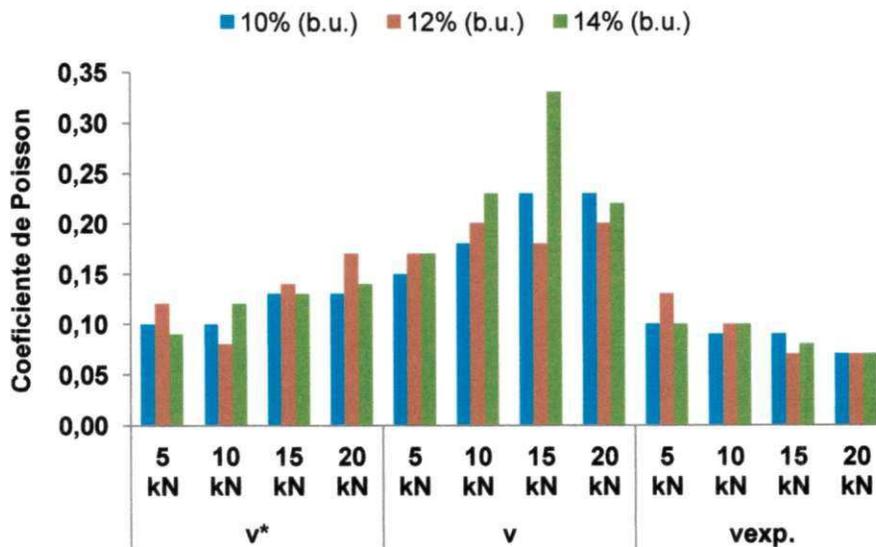


Figura 51 - Coeficiente de Poisson para grãos de milho triturado

A análise feita para os coeficientes de Poisson calculados, carregamento (ν^*) e descarregamento (ν), e o coeficiente de Poisson experimental ($\nu_{exp.}$), é atribuída ao exposto pela Figura 51, na qual se nota que os resultados de menor valor são vistos para carga de 5 kN e os maiores para a carga de 20 kN, observação esta aplicada somente para os coeficientes de Poisson calculados cujo inverso é obtido pelo coeficiente de Poisson experimental ($\nu_{exp.}$), além de seus valores comparados aos calculados serem bem menores.

Pode-se constatar, para o teor de umidade de 10% (b.u.) que os resultados do coeficiente de Poisson calculado (ν^*), se apresentam constantes para as duas primeiras cargas com valor de 0,10 e constantes para as duas últimas cargas com valor de 0,13.

Para o coeficiente de Poisson calculado (ν), da etapa de descarregamento este apresentou, para a carga de 5 kN, valor de 0,15, sendo este, o menor valor; já o maior valor (0,23) foi sinalizado para as duas últimas cargas (15 e 20 kN).

O coeficiente de Poisson experimental ($\nu_{exp.}$), apresentou, para este caso, o maior valor de 0,10 para a carga de menor intensidade (5 kN) e o menor valor de 0,07 para a carga de 20 kN.

Para o teor de umidade de 12% o coeficiente de Poisson calculado (ν^*), com os dados do carregamento, apresentou um dado interessante, em que todos os resultados obtidos pelas cargas foram superiores aos dos outros teores de umidade analisados, salvo o valor encontrado para a carga de 10 kN, em que foi sinalizado o menor valor (0,08) entre as cargas de compressão e dos outros teores de umidade, sendo o maior valor (0,17) creditado à carga de 20 kN.

Para o coeficiente de Poisson experimental ($\nu_{exp.}$) o maior valor (0,13) foi creditado à carga de 5 kN e o menor valor (0,07) igual aos obtidos pelos outros teores de umidade para a carga de 20 kN.

O teor de umidade de 14% (b.u.) apresentou, para o coeficiente de Poisson calculado (ν^*), para a etapa de carregamento, o menor valor (0,09) entre todos os teores de umidade para a carga de 5 kN; posteriormente, atingiu o valor máximo (0,14) para a carga de 20 kN.

Com um dado interessante o coeficiente de Poisson calculado (ν), para o descarregamento, fez com que se observasse, entre os outros valores dos teores de umidade, que o menor valor (0,17) foi obtido para 5 kN e o maior valor (0,33) para a carga de 15 kN, diferença que foi quantificada em 0,16 (48,48%); outra constatação foi a de que o valor encontrado para a carga de 20 kN apresentou, em comparação com o valor de 15 kN, uma redução de 33,33%, enquanto o coeficiente de Poisson experimental ($\nu_{exp.}$) não apresentou grandes valores sendo apenas o maior (0,10) resultado creditado para a carga de 5 kN e o menor (0,07) para a carga de 20 kN, apresentando diferença de 30%.

4.5.3.2. Módulo de elasticidade dos grãos de milho triturado

A Figura 52 apresenta os resultados para os módulos de elasticidade calculado (E) e experimental ($E_{exp.}$) para os grãos de milho triturado, para as quatro cargas de compressão em função dos teores de umidade.

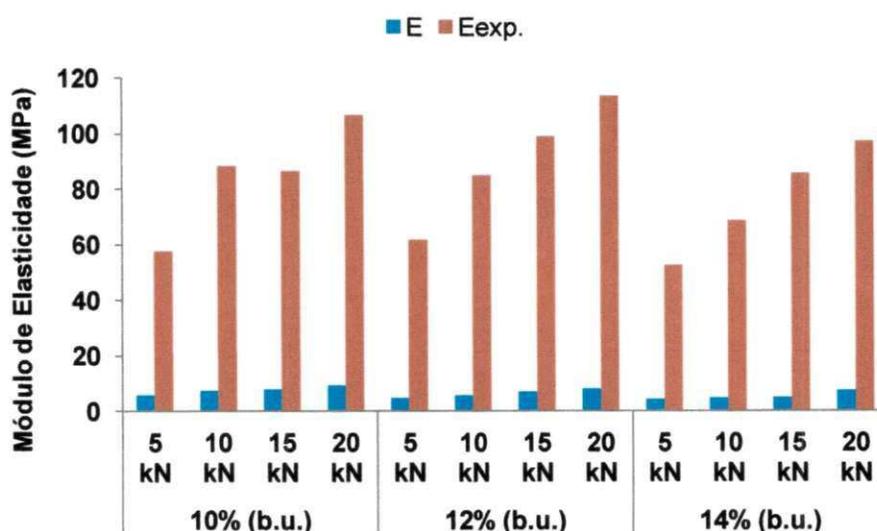


Figura 52 - Módulo de elasticidade para grãos de milho triturado

Na Figura 52 se expõem os resultados obtidos para módulo de elasticidade calculado (E) e experimental ($E_{exp.}$), em que os valores obtidos apresentam, para o calculado, aumento com o incremento de carga e o experimental, por uma oscilação de valores para o teor de umidade de 10% (b.u.) cujos valores para o teor de umidade de 14% (b.u.) são menores em comparação com a mesma carga dos teores de 10 e 12% (b.u.).

Outra observação entre o módulo de elasticidade calculado (E) e o experimental ($E_{exp.}$), é o fato de que eles apresentam uma diferença expressiva balizando-se apenas para os resultados da carga de 20 kN, e se chegando a valores de 91,36, 92,94 e 92,35%, respectivamente, para os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.).

Constata-se, para o teor de umidade de 10% (b.u.) que para o módulo de elasticidade calculado (E), seus resultados apresentaram aumento com o acréscimo das cargas, sendo o menor valor 5,87 MPa encontrado para a carga de 5 kN, de 63,66% do maior valor (9,22 MPa), sinalizado para a carga de 20 kN.

O módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$) obteve uma oscilação para os valores das cargas de 10 e 15 kN; observa-se também que o valor da carga de 15 kN apresentou redução de 2,13% de seu valor, em relação ao apresentado pela carga de 10 kN mantendo, desta forma, os valores, em um patamar muito próximo; para este caso o valor mínimo foi de 54,04% do valor máximo (106,67 MPa) sinalizado para a carga de 20 kN.

Analisando o teor de umidade de 12% (b.u.) para o módulo de elasticidade calculado (E) observa-se que ele segue o mesmo comportamento do teor de umidade de 10% (b.u.) com valor mínimo de 4,7 MPa, para a carga de 5 kN e valor máximo de 7,99 MPa para a carga de 20 kN.

Para o módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$) obteve-se o valor mínimo de 61,57 MPa, para a carga de 5 kN e máximo de 113,22 MPa para carga de 20 kN; na diferença de 45,62% também se notou, para este caso, que os valores obtidos para todas as cargas foram superiores aos obtidos para os outros teores de umidade estudados.

O teor de umidade de 14% (b.u.) apresentou os seguintes resultados para o módulo de elasticidade calculado (E) cujos valores foram de 4,17 e 7,42 MPa, respectivamente para as cargas de 5 e 20 kN.

O módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$) tal como os dos outros teores de umidade, apresentou um aumento com o acréscimo de carga sendo sinalizados, para o menor valor 52,53 MPa, a carga de 5 kN e o maior valor 97,01 MPa para a carga de 20 kN.

Em seu trabalho utilizando método acústico em análise para seis tipos de grãos alimentícios Stasiak et al. (2007), concluíram que o módulo de elasticidade aumenta com o acréscimo da pressão e diminui quando o teor de umidade aumenta.

Esses autores encontraram, para os grãos de milho, uma variação de 10 a 32 MPa para o teor de umidade de 17% (b.u.) mas, respeitando as condições de análise de ambos os trabalhos, encontrou-se, para o mesmo produto, um valor máximo para o módulo de elasticidade calculado (E), de 9,22 MPa para o teor de umidade de 10% (b.u.).

4.5.3.3. Ângulo de dilatância dos grãos de milho triturado

Os resultados ilustrados na Figura 53 remetem aos valores dos ângulos de dilatância encontrados para os grãos de milho triturado referentes às quatro cargas de compressão em relação à dos teores de umidade.

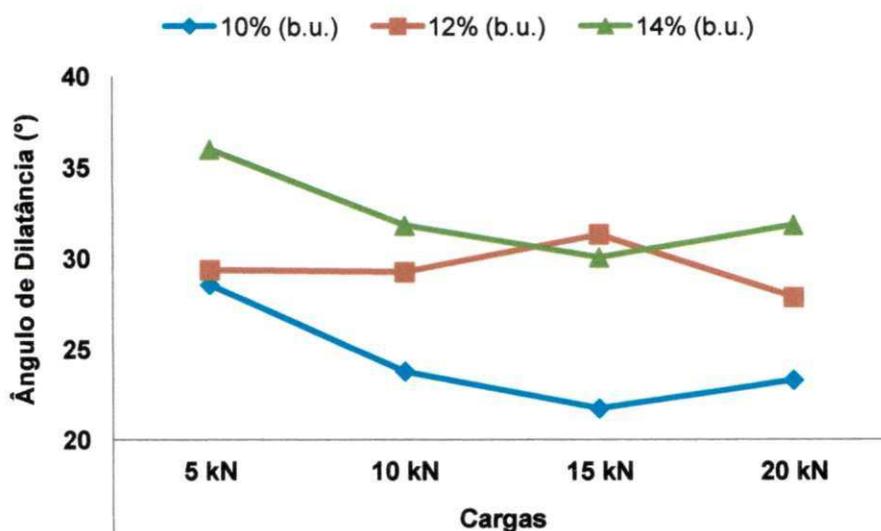


Figura 53 - Ângulo de dilatância para grãos de milho triturado

Segundo os dados dos ângulos de dilatância obtidos para os grãos de milho triturado, as curvas dos teores de umidade de 10 e 14% (b.u.), apresentaram comportamento semelhante com os maiores valores atribuídos à carga de 5 kN e os menores à carga de 15 kN oferecendo, também, um leve acréscimo dos ângulos para a carga de 20 kN.

A diminuição dos ângulos de dilatância constatada de 5 kN para 15 kN foi de 31,49 e 19,79%, respectivamente, para os teores de 10 e 14% (b.u.); já para o aumento em relação ao menor valor da carga de 15 kN, para os dois teores de umidade de 10 e 14% (b.u.) foi respectivamente, de 7,23 e 5,92%.

Os valores do ângulo de dilatância para o teor de umidade de 12% (b.u.), permaneceram constantes para as duas cargas iniciais (5 e 10 kN), apresentando, um aumento para a carga de 15 kN de 7,07% em relação ao menor valor de 29,27° (carga de 10 kN) e diminuição para a carga de 20 kN de 12,49% em relação ao maior valor (31,34°) da carga de 15 kN.

Ayuga (2001b) apud Guaita et al. (2003) relata que o ângulo de dilatância é um dos dados necessários para se usar o critério de elastro-plástico de Drucker-Prager e para as definições das regras de fluxo, que determinam a direção da plasticidade.

Os grãos de milho triturado estão enquadrados na classificação do autor, ao afirmar que quando o ângulo de dilatância (ψ) for menor que o ângulo de atrito interno (ϕ) haverá menos expansão volumétrica.

4.5.3.4. Curvas características dos grãos de milho triturado

A visualização do ocorrido no ensaio dos grãos de milho triturado pode ser observada nas Figuras 54, 55 e 56, as quais reúnem dados de valores médios de tensão (σ_y) versus deformação (ϵ_y), de todo o percurso do ensaio para os quatro níveis de carga e para os respectivos teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.).

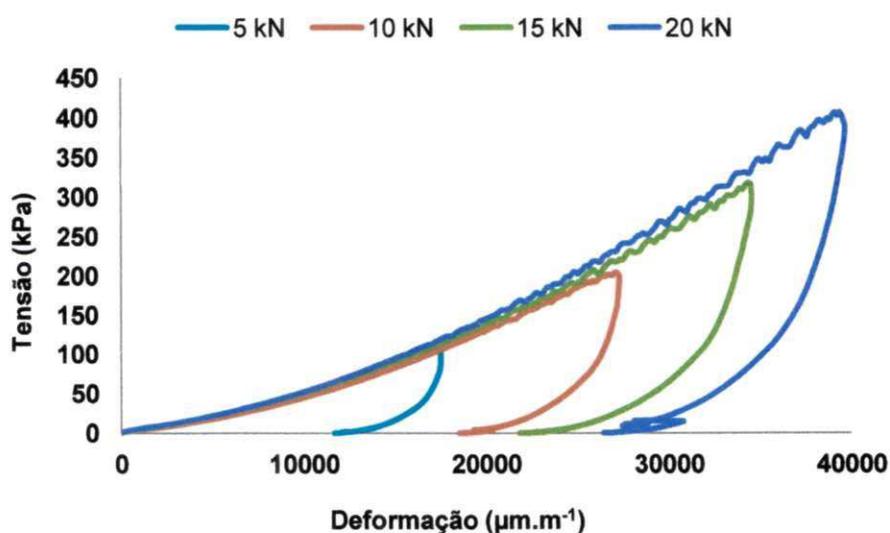


Figura 54 - Curvas características para grãos de milho triturado a 10% (b.u.)

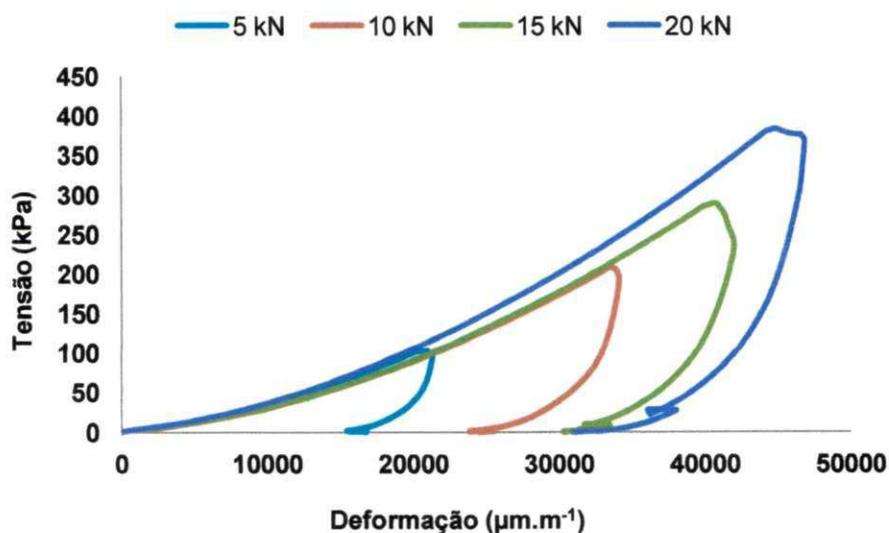


Figura 55 - Curvas características para grãos de milho triturado a 12% (b.u.)

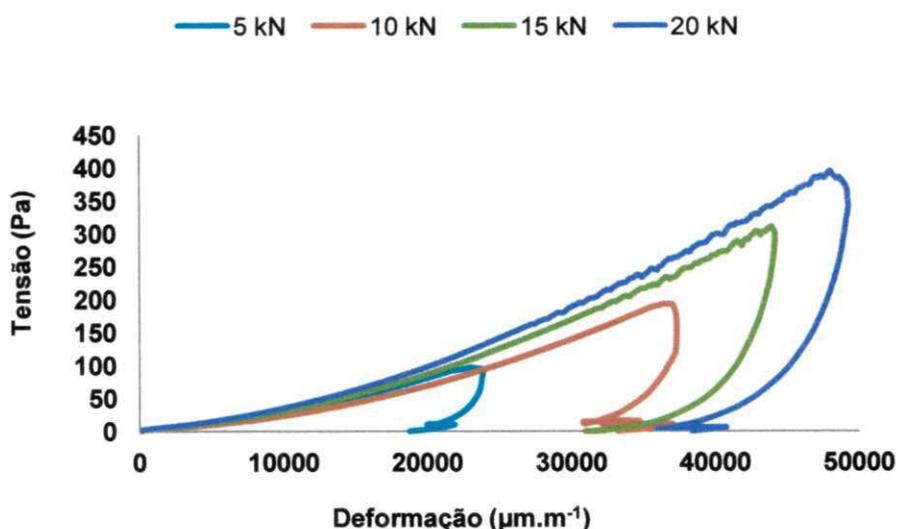


Figura 56 - Curvas características para grãos de milho triturado a 14% (b.u.)

Os ensaios do teor de umidade de 10% (b.u.) são representados pelas curvas plotadas na Figura 54, as quais curvas estão sobrepostas até a carga de 5 kN na primeira etapa do ensaio (carregamento); logo após há um distanciamento das mesmas para a referida etapa; as curvas de 10, 15 e 20 kN apresentam um sobe e desce no decorrer do ensaio advindos da organização das partículas do produto no interior do equipamento de determinação das propriedades mecânicas uma vez que o produto possui partículas muito irregulares e maior distribuição granulométrica.

A Figura 55, que representa as curvas obtidas para o teor de umidade de 12% (b.u.) apresenta, para a primeira etapa do ensaio (carregamento) duas sobreposições, uma para as cargas de 5 e 20 kN e a outra para as cargas 10 e 15 kN.

As curvas do ensaio do teor de umidade de 14% (b.u.) aparecem plotadas na Figura 56, observando-se a sobreposição das curvas referentes às cargas de 5, 15 e 20 kN para a etapa de carregamento, condição esta observada até a carga de 5 kN; outra observação referente a esses dados é que as curvas de 15 e 20 kN apresentaram um sobe e desce no decorrer do ensaio, comportamento este semelhante ao das curvas de 10, 15 e 20 kN do teor de umidade de 10% (b.u.).

Assim, todas as curvas para todos os teores de umidade apresentaram comportamento já previsto.

A seguir se apresenta a Tabela 16 com um resumo dos valores médios das propriedades mecânicas dos produtos granulares estudados.

Tabela 16 - Valores médios dos produtos granulares

| Produtos | U (%) | ν^* | ν | $\nu_{exp.}$ | E (MPa) | $E_{exp.}$ (MPa) | Ψ (°) |
|-----------------|-------|---------|-------|--------------|---------|------------------|------------|
| Arroz | 10 | 0,15 | 0,15 | 0,08 | 13,83 | 89,54 | 15,48 |
| | 12 | 0,14 | 0,20 | 0,08 | 13,99 | 76,55 | 17,06 |
| | 14 | 0,12 | 0,16 | 0,08 | 10,43 | 82,65 | 21,69 |
| Feijão | 10 | 0,11 | 0,22 | 0,10 | 5,29 | 70,20 | 28,82 |
| | 12 | 0,13 | 0,22 | 0,11 | 5,26 | 72,33 | 25,96 |
| | 14 | 0,16 | 0,22 | 0,12 | 4,33 | 65,39 | 33,12 |
| Milho Triturado | 10 | 0,12 | 0,20 | 0,09 | 7,56 | 84,74 | 24,34 |
| | 12 | 0,13 | 0,19 | 0,09 | 6,30 | 89,59 | 29,47 |
| | 14 | 0,12 | 0,24 | 0,09 | 5,28 | 75,91 | 32,44 |

Teor de umidade (U): porcentagem em base úmida

4.6. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PRODUTOS PULVERULENTOS

Os resultados das propriedades mecânicas, tal como sua discussão para os produtos pulverulentos, farinha de mandioca e milho, são abordados nos tópicos abaixo, em que os resultados são relacionados aos teores de umidade de 10 e 12% (b.u.) e para as quatro cargas de compressão (5, 10, 15 e 20 kN).

Uma das propriedades mecânicas analisadas é o coeficiente de Poisson calculado por meio da Equação 11 para a etapa de carregamento (ν^*), pela Equação 19, para a etapa de descarregamento (ν) e pela Equação 21, para a etapa de descarregamento utilizando-se os dados experimentais ($\nu_{exp.}$), obtidos pelo equipamento de determinação das propriedades mecânicas.

Para o cálculo do módulo de elasticidade calculado (E) e o módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$), os dados foram obtidos na segunda etapa do ensaio (descarregamento) do primeiro estágio (AB) como ilustra a Figura 14.

Os cálculos para o resultado do módulo de elasticidade calculado (E) foram obtidos a partir das Equações 17, 18 e 19; já para obtenção dos resultados do

módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$), se utilizaram gráficos de tensão-deformação extraíndo, deles, a informação da fração linear (retilínea) onde se caracteriza a deformação elástica.

O ângulo de dilatação (Ψ) foi obtido mediante utilização da Equação 25.

Para a análise, comparação e aprovação dos ensaios, os valores obtidos da tensão vertical (σ_y) e da deformação vertical (ϵ_y) os dois valores médios de cada ensaio foram plotados visualizando-se o percurso completo do ensaio (carregamento e descarregamento) conforme ilustrado na Figura 14.

4.6.1. Farinha de Mandioca

4.6.1.1. Coeficiente de Poisson da farinha de mandioca

Os resultados obtidos para o coeficiente de Poisson da farinha de mandioca para a etapa de carregamento (v^*), para a etapa de descarregamento (v) e para a etapa de descarregamento utilizando-se os dados experimentais ($v_{exp.}$), para quatro cargas de compressão em relação aos teores de umidade, são apresentados na Figura 57.

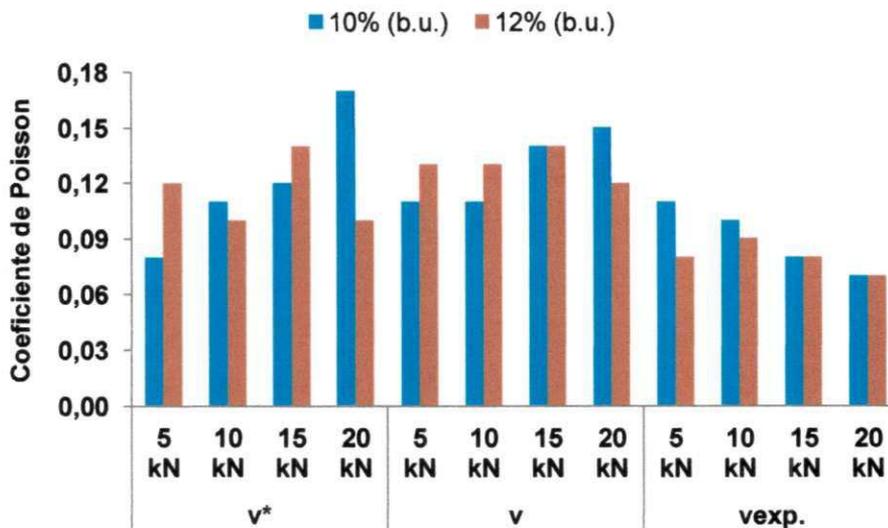


Figura 57 - Coeficiente de Poisson para a farinha de mandioca

A Figura 57 ilustra os resultados obtidos para os coeficientes de Poisson calculados para as etapas de carregamento (ν^*), descarregamento (ν) e para o experimental ($\nu_{exp.}$), podendo-se observar que os valores para o teor de umidade de 10% (b.u.), aumentaram com o acréscimo das cargas, afirmação válida apenas para os coeficientes de Poisson calculados, carregamento (ν^*) e descarregamento (ν); já o coeficiente de Poisson experimental ($\nu_{exp.}$) apresentou ordem inversa.

Os resultados obtidos para o teor de umidade de 12 (b.u.) apresentaram, para o coeficiente de Poisson calculado e experimental, uma oscilação embora não tenha sido possível a identificação de um padrão; mesmo assim, os valores obtidos experimentalmente são inferiores aos calculados para todos os teores de umidade analisados.

Observa-se, para o teor de umidade de 10% (b.u.) que os resultados obtidos para o coeficiente de Poisson calculado (ν^*), para a etapa de carregamento apresentaram valor mínimo de 0,08 para a carga de 5 kN e o máximo de 0,17 para a carga de 20 kN, totalizando uma diferença de 0,09 (52,94%), porém ocorreu um aumento abrupto do valor (0,12), da carga de 15 kN para a de 20 kN.

O coeficiente de Poisson calculado (ν) para a etapa de descarregamento apresentou resultados iguais (0,11), para as duas primeiras cargas (5 e 10 kN), e, para as duas últimas, aumento do coeficiente atingindo o máximo de 0,15 para a carga de 20 kN; por sua vez, o coeficiente de Poisson experimental ($\nu_{exp.}$), demonstrou ser o inverso, como seu maior valor de 0,11 para a carga de 5 kN e o menor valor de 0,07 para a carga de 20 kN.

Os resultados vinculados ao teor de umidade de 12% para o coeficiente de Poisson calculado (ν^*), para o carregamento oscilaram de seus valores, sendo os coeficientes menores (0,10) sinalizados para as cargas de 10 e 20 kN e o maior (0,14) para a carga de 15 kN.

O coeficiente de Poisson calculado (ν) com os dados de descarregamento, foi constante para as de 5 e 10 kN com resultado obtido de 0,13 e o menor valor (0,12) encontrado para a carga de 20 kN; outrossim, o maior valor (0,14) para a carga de 15 kN.

Para o coeficiente de Poisson experimental ($\nu_{exp.}$) o maior valor (0,09) foi creditado para a carga de 10 kN e o menor valor (0,07) para a carga de 20 kN,

sendo também o valor do coeficiente experimental (0,08), igual para as outras cargas (5 e 15 kN).

4.6.1.2. Módulo de elasticidade dos pós da farinha de mandioca

Os resultados dos módulos de elasticidade calculado (E) e experimental ($E_{exp.}$) para a farinha de mandioca são apresentados na Figura 58, para as quatro cargas de compressão em relação aos teores de umidade.

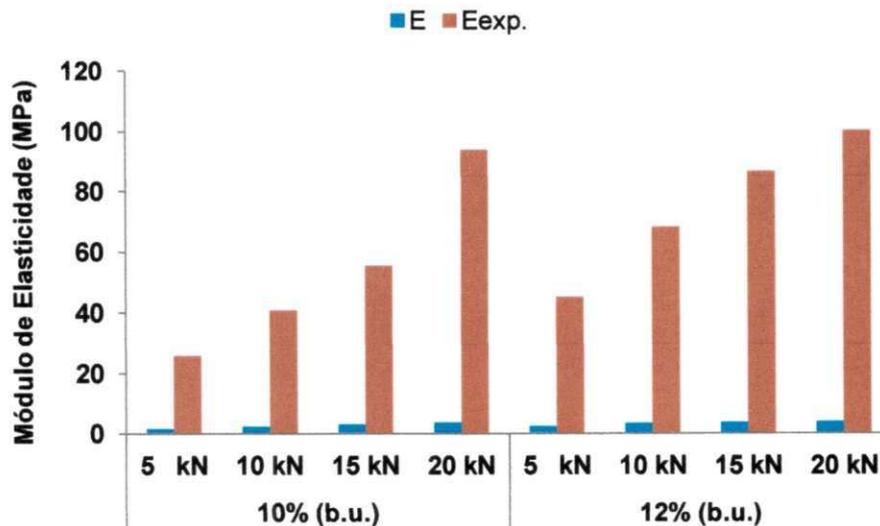


Figura 58 - Módulo de elasticidade para a farinha de mandioca

Analisando a Figura 58 que ilustra os resultados dos módulos de elasticidade calculado (E) e experimental ($E_{exp.}$) observa-se, que eles tiveram seus valores acrescidos com o aumento das cargas impostas para todos os teores de umidade e que a diferença entre os valores dos módulos de elasticidade calculado (E) e experimental ($E_{exp.}$), calculando-se apenas para os resultados da carga de 20 kN, a 96,21 e 95,88%, respectivamente, para os teores de umidade de 10 e 12% (b.u.).

O teor de umidade de 10% (b.u.) apresentou, para o módulo de elasticidade calculado (E), os valores mínimo de 1,56 MPa e máximo de 3,56 MPa, respectivamente, para a carga de 5 e 20 kN, com diferença de 56,18%; já para o módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$), com valores superiores aos do

calculado, apresenta uma diferença entre o menor valor e o valor maior obtido de 72,49%, sendo esses valores limites para as cargas de 5 e 20 kN, respectivamente.

Para o teor de umidade de 12% (b.u.) os valores encontrados para o módulo de elasticidade calculado (E) apresentaram comportamento semelhante ao do teor de umidade de 10% (b.u.), em que os valores do módulo de elasticidade aumentam com o acréscimo das cargas impostas, sendo o menor valor encontrado de 2,34 para a carga de 5 kN e o maior 4,13 para a carga de 20 kN; observou-se, também, que os resultados obtidos são superiores aos do teor de umidade inferior.

O módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$), também apresentou comportamento previsto para o teor de umidade de 10% (b.u.) com valores mínimo de 45,08 MPa e máximo de 100,29 MPa, respectivamente, para as cargas de 5 e 20 kN, significando uma diferença de 55,05%, sendo observado, também, que os resultados obtidos são superiores aos do teor de umidade inferior.

4.6.1.3. Ângulo de dilatância da farinha de mandioca

A Figura 59 ilustra os valores do ângulo de dilatância encontrados para a farinha de mandioca, para as quatro cargas de compressão, em relação aos teores de umidade.

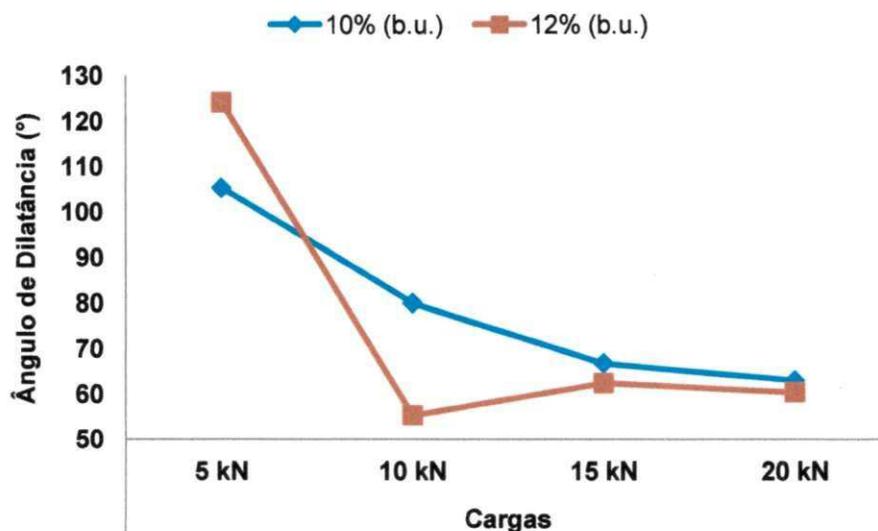


Figura 59 - Ângulo de dilatância para a farinha de mandioca

Para a farinha de mandioca os dados do ângulo de dilatância apresentaram diminuição com o aumento da carga imposta para todos os teores de umidade.

O teor de umidade de 10% (b.u.) apresentou queda de 105,25° (maior valor) referente à carga de 5 kN para o menor valor (62,99°) referente à carga de 20 kN; uma diferença de 40,15%.

Os valores dos ângulos de dilatância obtidos para o teor de umidade de 12% (b.u.) apresentaram uma queda abrupta de 68,8° (55,4%), de 5 kN para 10 kN; em seguida, houve um aumento de 7,1° (12,82%) para a carga de 15 kN e um decréscimo, a seguir, para a carga de 20 kN de 2,02° (3,23%).

Tal como visto para os valores dos ângulos de dilatância da farinha de mandioca, Ramírez et al. (2009), encontraram a mesma tendência para o ângulo de dilatância, ou seja, os valores dos ângulos diminuem com o aumento da carga imposta.

4.6.1.4. Curvas características da farinha de mandioca

As Figuras 60 e 61 ilustram o comportamento que a farinha de mandioca apresentou nos ensaios de compressão. Para observação do comportamento dos ensaios foram plotados gráficos dos valores médios de tensão (σ_y) versus deformação (ϵ_y), de todo o percurso do ensaio, para os quatro níveis de carga e para os respectivos teores de umidade.

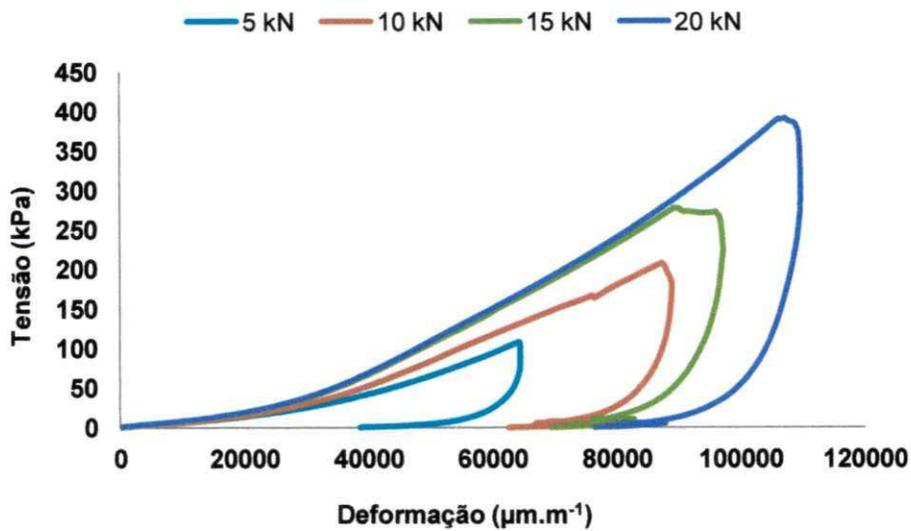


Figura 60 - Curvas características para a farinha de mandioca a 10% (b.u.)

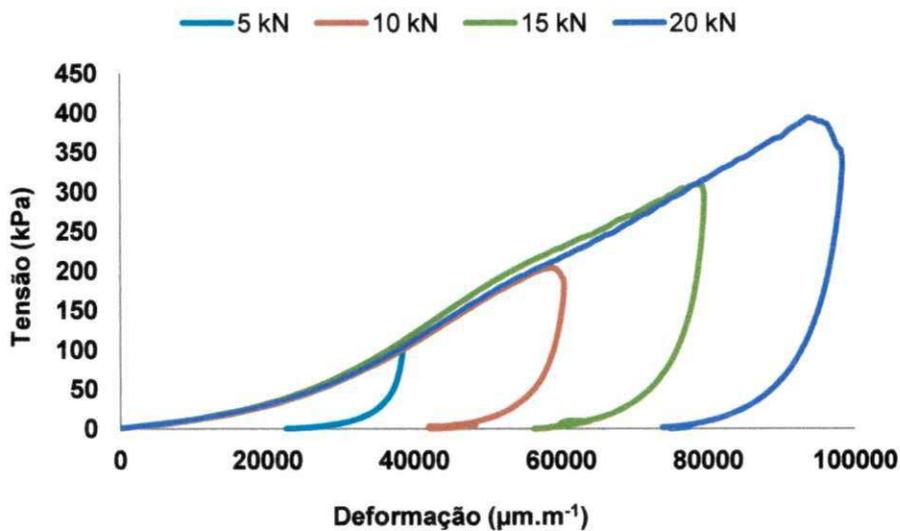


Figura 61 - Curvas características para a farinha de mandioca a 12% (b.u.)

Observa-se, na Figura 60, que as curvas mantiveram coerência no decorrer do ensaio apesar das curvas de 5 e 10 kN não apresentarem uma sobreposição na primeira etapa do ensaio (carregamento) como as curvas de 15 e 20 kN. Nota-se também que as curvas proporcionaram um prolongamento maior evidenciando maior deformação para todas as cargas.

As curvas da Figura 61 se apresentam com o formato aguardado, onde pode ser visto claramente o percurso sobreposto das curvas para a primeira etapa do ensaio (carregamento), salvaguardando as proporções das cargas impostas.

a carga de 20 kN, chega a 93,05 e 94,58%, respectivamente, para os teores de umidade de 10 e 12% (b.u.).

Ao analisar os dados para o teor de umidade de 10% concluiu-se que o módulo de elasticidade calculado (E) apresentou resultados que aumentaram com o acréscimo da carga e a diferença entre a carga de 15 kN e a de 20 kN é apenas de 6,29% sendo, para este caso, o menor valor de 4,86 MPa para carga de 5 kN e o maior valor 28,95% superior para a carga de 20 kN.

O módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$) apresentou, por sua vez, valores superiores aos calculados, além de, aumento com o acréscimo da carga, sinalizado para o menor valor 39,25 MPa para a carga de 5 kN e o maior valor 98,43 MPa para a carga de 20 kN.

Para o teor de umidade de 12% (b.u.), os dados do módulo de elasticidade calculado (E), apresentaram oscilação nos resultados, apesar do menor (4,12 MPa) e o maior (5,42 MPa), valores encontrados serem atribuídos às carga de 5 e 20 kN, respectivamente.

Para o módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$) observou-se que os valores do módulo aumentaram com o emprego da carga, conforme os dados obtidos para o teor de umidade de 10%. A diferença entre os valores mínimo e máximo foi de 58,88%. Constatou-se, ainda, que o valor obtido com a carga de 15 kN foi 6,98% do maior valor (100,07 MPa) encontrado.

Ramírez et al. (2009), detectaram, estudando o módulo de elasticidade das farinhas de milho, trigo, cevada e soja que, após o terceiro ciclo de compressão, a pressão necessária para a farinha de milho se consolidar é maior que a das outras farinhas e por isso apresenta comportamento mais plástico; no entanto, seu módulo de elasticidade (94,4 MPa para a carga de 180,86 kPa) é maior que o registrado para as outras farinhas implicando certo grau de consolidação; contudo, as farinha de trigo, a cevada e de soja, apresentou-se de maneira menos rígida como pode ser visto nos valores do coeficiente de Poisson, como encontrados na sua pesquisa. Este valor encontrado para o módulo de elasticidade pelo autor se assemelha ao valor do módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$) para os teores de umidade analisados.

Ramírez et al. (2009) encontraram, em seu primeiro ciclo do ensaio de compressão, para o módulo de elasticidade da farinha de milho (4,2 MPa para a carga de compressão de 361,72 kPa) coerente com este trabalho.

4.6.2.3. Ângulo de dilatância da farinha de milho

Os resultados ilustrados na Figura 64 remetem aos valores dos ângulos de dilatância encontrados para a farinha de milho referentes às quatro cargas de compressão, em relação dos teores de umidade.

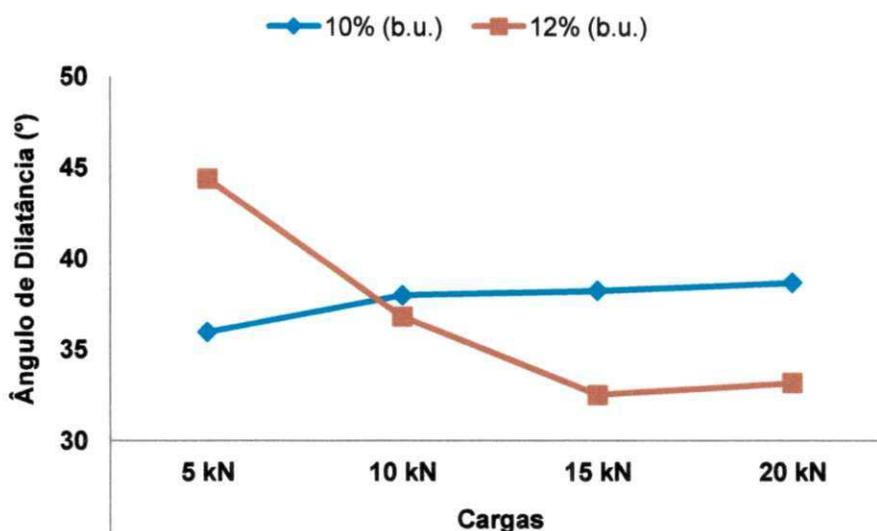


Figura 64 - Ângulo de dilatância para a farinha de milho

Analisando os ângulos de dilatância para a farinha de milho observa-se, que para o teor de umidade de 10% um crescimento da menor carga de 5 kN com valor de 35,96° para a maior carga de 20 kN registrando 38,71°, sendo este aumento de 7,11%.

Os ângulos de dilatância obtidos para o teor de umidade de 12% apresentaram queda em relação ao aumento da carga. O maior valor do ângulo de dilatância foi de 44,38° para a carga de 5 kN e o menor valor (32,49°) para a carga de 15 kN, ou seja, uma diferença de 26,79%, além de um pequeno aumento do ângulo que foi observado para a carga de 20 kN valor este de 0,67°.

Ayuga (2001b) apud Guaita et al. (2003) relata que o ângulo de dilatância é um dos dados necessários para se usar o critério de elastro-plástico de Drucker-Prager e para as definições das regras de fluxo que determinam a direção da plasticidade. A farinha de milho se enquadra na classificação do autor, ao afirmar que quando o ângulo de dilatância (ψ) for menor que o ângulo de atrito interno (ϕ) haverá menos expansão volumétrica.

Ramírez et al. (2009) constataram a mesma tendência para o ângulo de dilatância encontrada para este trabalho, ou seja, os valores dos ângulos diminuem com o aumento da carga. Moya et al. (2006) também verificaram tal tendência; à medida em que a pressão vertical aumenta o deslocamento horizontal das partículas, é dificultado, aumentando sua resistência global ao cisalhamento como, por exemplo, a farinha de soja, que apresenta essa tendência para dilatar sobre diferentes pressões verticais.

4.6.2.4. Curvas características da farinha de milho

O comportamento dos dados médios da tensão (σ_y) versus deformação (ϵ_y), dos ensaios mecânicos da farinha de milho para os quatro níveis de carga e seus respectivos teores de umidade de 10 e 12% (b.u.), são apresentados nas Figuras 65 e 66.

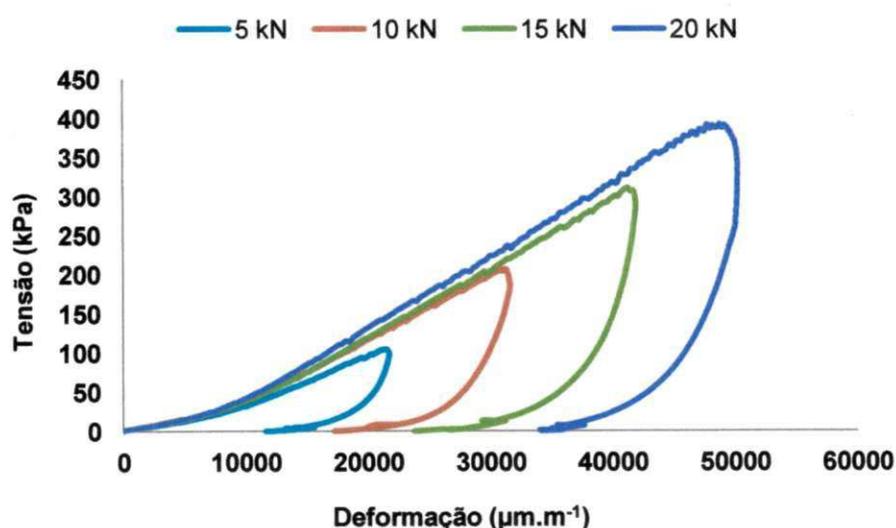


Figura 65 - Curvas características para a farinha de milho a 10% (b.u.)

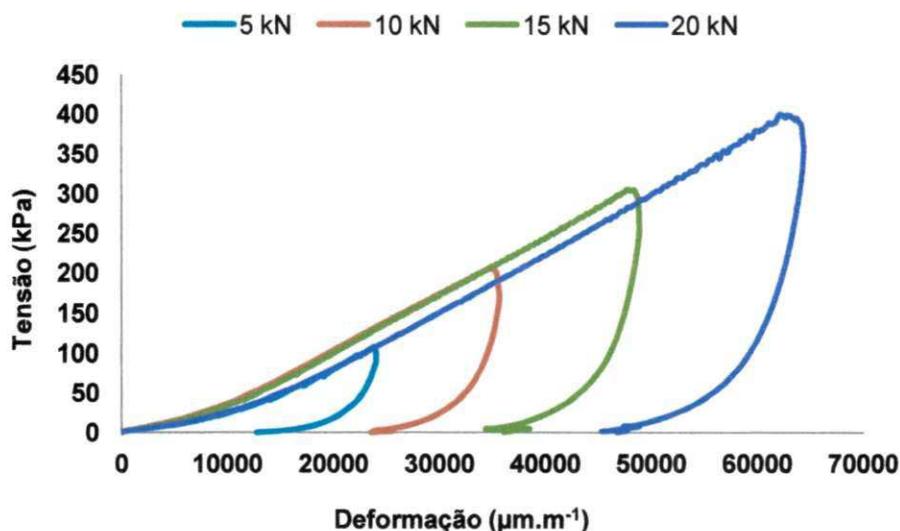


Figura 66 - Curvas características para a farinha de milho a 12% (b.u.)

A Figura 65 ilustra as curvas traçadas pelos dados obtidos pelo ensaio de compressão. Apenas as curvas de 10 e 15 kN apresentam sobreposição para o início do ensaio (carregamento). É possível notar descontinuidade nas retas da primeira etapa para todas as curvas, com um efeito de sobe e desce devido ao escorregamento do produto na parede do equipamento de determinação das propriedades mecânicas haja vista que este pó estava com baixo teor de umidade e uma distribuição granulométrica maior.

As curvas que ilustram a Figura 66 apresentam duas sobreposições para a etapa de carregamento, sendo uma para as cargas de 5 e 20 kN e a outra para as cargas de 10 e 15 kN. Nota-se também, que as curvas apresentaram um efeito de sobe e desce, como constatado para as curvas do teor de umidade de 10% (b.u.) da Figura 65.

Todas as curvas apresentaram, para todos os teores de umidade, o comportamento esperado.

Apresenta-se, a seguir a Tabela 17 com o resumo dos valores médios das propriedades mecânicas dos produtos pulverulentos estudados.

Tabela 17 - Valores médios dos produtos pulverulentos

| Produtos | U (%) | v* | v | v _{exp.} | E (MPa) | E _{exp.} (MPa) | Ψ (°) |
|---------------------|-------|------|------|-------------------|---------|-------------------------|-------|
| Farinha de Mandioca | 10 | 0,12 | 0,13 | 0,09 | 2,65 | 54,01 | 78,75 |
| | 12 | 0,12 | 0,13 | 0,08 | 3,42 | 75,03 | 75,63 |
| Farinha de Milho | 10 | 0,13 | 0,22 | 0,08 | 5,80 | 69,85 | 37,73 |
| | 12 | 0,13 | 0,21 | 0,09 | 4,81 | 74,48 | 36,71 |

Teor de umidade (U): porcentagem em base úmida

5. CONCLUSÕES

5.1. Propriedades Físicas

Os grãos de arroz, de feijão e de milho triturado, foram classificados como produtos granulares apesar do milho triturado apresentar maior distribuição granulométrica.

A farinha de mandioca e a de milho possuem maior distribuição granulométrica e são classificadas como produtos pulverulento coesivo.

5.2. Propriedades Fluxo

✓ O peso específico consolidado (γ), médio do arroz obteve um aumento com o acréscimo do teor de umidade; já o do feijão se manteve constante e o do milho triturado obteve redução quanto ao aumento do teor de umidade, sendo esta de 4,08 e 2,64% para os teores de umidade de 12 e 14% (b.u.), respectivamente, em comparação com o teor de umidade de 10% enquanto com o aumento do teor de umidade foi observada, para os ângulos de atrito interno (ϕ) e efetivo ângulo (δ) redução na variação entre seus limites e para algumas situações em ordem inversa.

Já a coesão (C) dos grãos de arroz apresentou redução dos valores com o acréscimo do teor de umidade; a dos grãos de feijão sinalizou um aumento de 10% (b.u.), para 12% (b.u.), e uma redução de 12% (b.u.), para 14% (b.u.); para o milho triturado a coesão sofreu redução dos valores com o aumento do teor de umidade.

✓ Para os produtos pulverulentos o peso específico consolidado (γ) médio da farinha de mandioca apresentou aumento com o acréscimo do teor de umidade se identificou, para a farinha de milho, comportamento inverso enquanto os ângulos de atrito interno (ϕ) e efetivo ângulo (δ) apresentaram aumento na variação entre seus limites, com o aumento do teor de umidade.

A coesão (C) obtida para farinha de mandioca apresentou aumento de 41,67% enquanto para a farinha de milho obteve uma redução de 11,2%, com o acréscimo do teor de umidade.

✓ O índice de fluxo dos grãos de arroz foi considerado zona de transição entre o fluxo coesivo e o fácil; o dos grãos de feijão foi classificado como fluxo fácil e o dos grãos de milho triturado considerado zona de transição entre o fluxo muito coesivo e o coesivo.

✓ Os índices de fluxo dos produtos pulverulentos foram classificados como de fluxo coesivo para a farinha de mandioca e em uma zona de transição entre o fluxo coesivo e o fácil para a farinha de milho.

✓ Para o ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) dos produtos granulares, houve um acréscimo dos valores com o aumento do teor de umidade, sendo os ângulos dos grãos de arroz detectados como os de maior valor para todos os teores de umidade e os valores dos grãos de feijão como os de menores valores.

✓ Para o ângulo de atrito com a parede (ϕ_w), referente à farinha de mandioca, os valores dos limites extremos apresentaram redução com o aumento do teor de umidade de 48,84% para o limite inferior e para o superior, de 26,63%.

Já no ângulo de atrito com a parede (ϕ_w), referente à farinha de milho, a variação detectada entre os extremos foi de 4,24% para o limite inferior e para superior, que foi de 7,26%, observando-se também um aumento dos valores em relação ao aumento do teor de umidade.

✓ Todos os valores do fator K calculados pelas diversas formulações propostas pelos autores e normas internacionais, independentemente do teor de umidade, apresentaram valores superiores aos encontrados pelo fator K experimental ($K_{exp.}$), para os produtos granulares e pulverulentos.

Dentre as formulações propostas as que mais se distanciaram dos valores obtidos em laboratório foram a teoria de Hartmann (1966) e a norma DIN 1055 (2005). Faz-se uma ressalva para o fator K experimental ($K_{exp.}$), do teor de umidade de 12% (b.u.) para os grãos de milho triturado que apresentaram valores

superiores aos das formulações propostas por Aoki (1978) e Frazer (1948) tal como as normas ACI 313 (1991) e AS 3774 (1996).

As equações que mais se aproximaram dos valores experimentais foram as de Aoki (1978), Frazer (1948) e ACI 313 (1991); recomenda-se, portanto, essas formulações, para determinação do fator k para o projeto de silos verticais.

5.3. Propriedades Mecânicas

✓ Os coeficientes de Poisson calculados para a etapa de carregamento (ν^*) e descarregamento (ν) apresentaram aumento de seus resultados com o acréscimo de carga, para todos os teores de umidade; detectou-se, para o coeficiente de Poisson experimental ($\nu_{exp.}$), uma redução dos valores encontrados sempre que a carga aumentava; este comportamento foi observado para todos os teores de umidade. O coeficiente de Poisson (ν) calculado para a etapa de descarregamento destacou-se por apresentar os maiores valores em relação aos outros coeficientes, para todos os teores de umidade e produtos analisados neste trabalho.

✓ Para todos os produtos investigados neste trabalho os módulos de elasticidade calculados (E) e experimentais ($E_{exp.}$) apresentaram aumento de seus resultados com o acréscimo das cargas, sendo os maiores valores atribuídos ao módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$).

Entre os produtos granulares o maior valor do módulo de elasticidade calculado (E) foi atribuído aos grãos de arroz para o teor de umidade de 12% (b.u.) e ao módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$); o maior valor foi para o milho triturado com teor de umidade de 12% (b.u.).

Para os produtos pulverulentos o maior valor do módulo de elasticidade calculado (E) foi obtido para a farinha de milho com teor de umidade de 10% (b.u.) e para o módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$) o maior valor foi identificado para a farinha de mandioca com teor de umidade de 12% (b.u.).

✓ O ângulo de dilatação de todos os produtos granulares e pulverulentos apresentou, para todos os teores de umidade, uma redução dos resultados à medida em que era acrescentada carga, salvo a farinha de milho para o teor de umidade de 10% (b.u.) que apresentou comportamento inverso.

✓ Todas as curvas características do ensaio de compressão para os produtos granulares e pulverulentos apresentaram, para todos os teores de umidade, comportamento esperado para o modelo teórico. Ressalta-se a farinha de mandioca por apresentar maior deformação dentre os outros produtos estudados.

6. SUGESTÕES

Visando ao aprofundamento nas pesquisas das propriedades mecânicas e a falta de um equipamento e metodologia padrão sugere-se, para futuros trabalhos a construção de um protótipo com um corpo de metal, de dimensões de 200 e 100 mm de altura e diâmetro, respectivamente, com dois flanges com as bases unidas por barras metálicas roscáveis, um pistão para transferência de força, seis extensômetros posicionados a 50,100 e 150 mm da base, para o registro da deformação lateral e uma célula de carga posicionada na base para o registro das cargas de compressão, como apresentado parcialmente na Figura 67.

As dimensões aqui citadas são apenas sugestões baseadas no equipamento trabalhado nesta pesquisa e em observações de outros modelos.



Figura 67 - Vista do protótipo sugerido

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 313. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Recommended practice for design and construction of concrete bins, silos and bunkers for storing granular materials**. EUA: 1991.
- Amorós, J.L; Mallol, G; Sánchez, E; Garcia, J. **Projeto de silos para o armazenamento de materiais na forma de pó. Problema associados à etapa de descarga**. Cerâmica Industrial, n° 7 (1), 2002, p.12-23.
- AOKI, R. Stresses of powders and granular materials in bins and hoppers. **Theory and Applied Mechanics**, v. 26, 1978, p.9-24.
- AS 3774. AUSTRALIAN STANDARD. **Loads on bulk containers**. Sydney: 1996.
- Batista, C. S. **Estudo teórico e experimental do fluxo de sólidos particulados em silos verticais**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande - PB, 2009, p.81.
- BRASIL. **Regras para análise de sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: Mapa/ACS, 2009, p.399.
- BRITISH MATERIALS HANDLING BOARD – BMHB. **Draft code of practice for the design of silos, bins, bunkers and hoppers**. Berkshire, 1985.
- Calil Junior, C. **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais**. São Carlos: USP, 1990, p.197.
- Calil Junior, C; Cheung, A. B. **Silos: pressões, fluxo, recomendações para projetos e exemplos de cálculo**. Editora Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos, SP, 2007, p.232.
- Campos, M. M. de. **Análise da escoabilidade de pós**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, 2012, p.126.
- Cheung, A. B. **Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), EESC/USP, São Carlos, 2007, p.305.

COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB 2012). **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, segundo levantamento, novembro 2012.** Disponível em:
http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_11_08_09_10_48_bol_etim_portugues_novembro_2012.pdf. Acesso em: 12 de novembro de 2012.

Couto, S. M.; Batista, C. S.; Peixoto, A. B.; Devilla, I. A. **Comportamento mecânico de frutos de café: módulo de deformidade.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.2, 2002, p.285-294.

DEUTSCHE NORM. DIN 1055: **Design loads for buildings: loads in silo bins.** Berlin: 2005.

EUROCODE 1. **Actions on structures - Part 4: Silos and tanks.** Bruxelas, 2006, p.108.

Freitas, E. G. A.. **Estudo teórico experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano.** Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), EESC/USP, São Carlos, 2001, p.175.

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

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

Guaita, M.; Couto, A.; Ayuga, F. Numerical simulation of wall pressure during discharge of granular material from cylindrical silos with eccentric hoppers. **Biosystems Engineering**, Santiago de Compostela, v.85, n.3, 2003, p.101-109.

Hartlen, J.; Nielsen, J.; Junggren, L.; Martensson, G.; Wigram, S. **The Wall Pressure in Large Grain Silos.** Swedish Council for Building Research, Stockholm, document D2, 1984.

Hibbeler, R. C. **Resistência dos Materiais.** Ed. 5ª, São Paulo: Pearson, 2004, p.670.

Jaky, J. **Pressure in silos.** In:...Proceedings of 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1, 1948, p.103-107.

- Jenike, A. W. **Storage and flow of silos**. Utah Engineering Experiment Station. Salt Lake City: University of Utah. Bolletín, 123, 1964, p.197.
- Juliano, P.; Muhunthan, B.; Cánovas, G. V. B. **Flow and shear descriptors of preconsolidated food powders**. Journal of Food Engineering, v. 72, n. 2, 2006, p.157-166.
- Laskowski, J.; Łysiak, G.; Skonecki, S. **Mechanical properties of granular agro-materials and food powders for industrial practice - Part II, Material properties for grinding and agglomeration**. Poland, Lublin, 2005, p.159.
- Lenczner, A. Investigation into the behaviour of sand in model silo. **The Structural Engineer**, v.41, n.12, 1963, p.389-398.
- Lopes Neto, J. P. Nascimento, J. W. B.; Silva, V. R.; Lopes, F. F. M. **Propriedade de fluxo e característica de escoabilidade de rações avícolas para dimensionamento de silos**. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v.31, n.3, 2007, p. 851-859.
- Lopes Neto, J. P.. **Análise teórico-experimental das forças verticais e de atrito em silos cilíndricos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande – PB, 2009, p.116.
- Lopes Neto, J. P.; Silva, V. R.; Nascimento, J. W. B. **Propriedades de fluxo de produtos pulverulentos alimentícios**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande - PB, v. 13, n.5, 2009, p.639-644.
- Lopes Neto, J. P.; Nascimento, J. W. B. **Características de fluxo e projeto de tremonhas cônicas em silos verticais**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.17, n.3, 2013, p.339-345.
- Madrona, F. S. **Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), EESC/USP, São Carlos, 2008, p.196.
- Magalhães, A. C.; Couto, S. M.; Queiroz, D. M.; Andrade, E. T.. **Dimensões principais, massa e volume unitários, esfericidade e ângulo de repouso de frutos de café**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.2, n.2, 2000, p.39-56.
- Molenda, M.; Stasiak, M. Determination of the elastic constants of cereal grains in a uniaxial compression test. **Institute of Agrophysics**, Lublin, Poland, n°16, 2002, p.61-65.

- Moya, M.; Guaita, M.; Aguado, P.; Ayuga, F.. Mechanical properties of granular agricultural materials, Part 2. *Trans. ASABE*, 49, 2006, p.479-489.
- Nascimento, F. C. & Calil Junior, C. **A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos elevados: o parâmetro K.** Caderno de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v.11, n. 52, 2009, p.17-37.
- Nóbrega, M. V.; Nascimento, J. W. B. **Fluxo de ração avícola em silos prismáticos com tremonha excêntrica.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, n.3, 2005, p.413-419.
- PN-89/B-03262. **Polish Standard.** Concrete bins for storing granular materials and silage. Design rules (in Polish). 1989.
- Ramírez, A; Moya, M; Ayuga, F. Determination of the mechanical properties of powdered agricultural products and sugar. *Inter Science*, 2009, p.220-230.
- Resende, C.; Corrêa, P. C.; Ribeiro, D. M.; Figueiredo Neto, A. **Comportamento mecânico dos grãos de feijão submetidos a compressão.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.11, n.4, 2007, p.404-409.
- Ribeiro, D. M.; Corrêa, P. C.; Furtado, B. F.; Goneli, A. L. D.; Resende, O. **Propriedades mecânicas dos grãos de soja em função do teor de água.** Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.27, n.2, 2007, p.493-500.
- Sawicki, A. Elasto-plastic interpretation of oedometric test. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 41 (1-2), 1994, p.111-131.
- Silva, F. S.; Corrêa, P. C.; Calil Júnior, C.; Gomes, F. C. **Ângulo de repouso, atrito interno e efetivo dos grãos de café com pergaminho.** Revista Brasileira de Agroindustriais, Campina Grande, v. 8, n° 1, 2006, p.17-23.
- Silva, F. S.; Corrêa, P. C.; Calil Júnior, C.; Gomes, F. C. **Análise dos coeficientes de atrito estático e dinâmico de grãos de café com pergaminho, determinados em diferentes equipamentos, teores de água e materiais de parede.** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande - PB, v. 13, n.2, 2011, p.143-156.
- Silva, J. S. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas.** 2ª Edição. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. p.560.
- Silva, J. S.; Corrêa, P. C.. Estrutura, composição e propriedades dos grãos. In: Silva, J. S.. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas.** 2ª Edição. Editora Aprenda Fácil, Viçosa – MG, 2008, p.19-36.

Souza, Á. B. M.; Devilla, I. A.; Bassinello, P. Z.; Melo, P. C.; Vieira Júnior, J. M.; Ribeiro, P. B. S. B. **Propriedades físicas de cultivares de grãos de feijão carioca (*Phaseolus vulgaris* L.)**. In:... I Congresso de Pesquisa e Pós-Graduação do Câmpus Rio Verde do IFGoiano, 2012, p.1-3.

Stasiak, M.; Molenda, M.; Rusinek, R.; Horabik, J. Właściwości mechaniczne złoża nasion rzepaku wyznaczone w teście jednoosiowego ściskania. **Acta Agrophysica**, 46, 2001, p.167-178.

Stasiak, M.; Molenda, M.; Horabik, J. Determination of modulus of elasticity of cereals and rapeseeds using acoustic method. **Science Direct**. Journal of Food Engineering, 82, 2007, p.51-57.

Stasiak, M.; Molenda, M.; Grossmann, L.; Müller, P. **Influence of technological parameters on compression and flow behaviour of cohesive powders.**

Disponível em:

http://www.mvt.ovgu.de/mvt_media/Votr%C3%A4ge/Stasiak_95.pdf.

Acesso em: 12 de novembro de 2012.