



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



**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FLUXO E MECÂNICAS
DE GRÃOS AGRÍCOLAS**

VALNEIDE RODRIGUES DA SILVA

**CAMPINA GRANDE - PARAÍBA
SETEMBRO - 2013**



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



VALNEIDE RODRIGUES DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FLUXO E MECÂNICAS DE
GRÃOS AGRÍCOLAS**

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

ORIENTADOR:

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

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA

SETEMBRO - 2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586c Silva, Valneide Rodrigues da.
Caracterização das propriedades de fluxo e mecânicas de grãos agrícolas / Valneide Rodrigues da Silva. – Campina Grande, 2012.
119 f. : color.

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

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

1. Propriedades Físico-Mecânicas. 2. Grãos. 3. Silos. 4. Compressão Uniaxial. I. Lopes Neto, José Pinheiro. II. Título.

CDU 631.563 (043)



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



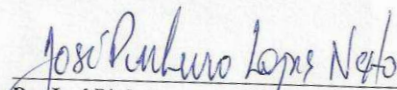
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO

VALNEIDE RODRIGUES DA SILVA

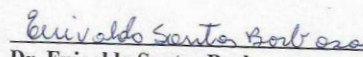
CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FLUXO E MECÂNICAS DE
GRÃOS AGRÍCOLAS

BANCA EXAMINADORA

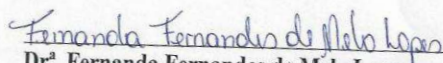
PARECER


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

Aprovada


Dr. Enivaldo Santos Barbosa
Examinador (UFCG)

Aprovada


Dr^a. Fernanda Fernandes de Melo Lopes
Examinadora (CCTA/UFCG)

Aprovada

SETEMBRO DE 2013

Av. Aprígio Veloso, 882 – Bodocongó
58429-140 – CAMPINA GRANDE - PB
Fone: (83) 2101.1055. Fax: (83) 2101.1185
<http://www.deag.ufcg.edu.br/copeag>

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me presenteia com de que necessito para ser feliz;

Aos Professores Dr. José Pinheiro Lopes Neto e Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento, pela orientação no desenvolvimento e na conclusão deste trabalho;

Ao Prof. Fernando Almeida da Silva, pela amizade, orientação, disposição e fundamental ajuda durante a etapa dos ensaios mecânicos deste trabalho

À Comissão Examinadora;

A minha mãe Maria Emília, pela vida, pelo apoio, pelos ensinamentos e pela dedicação em todos os momentos;

Ao meu pai Valderi (in memoriam) pelo apoio, pelos ensinamentos e pela dedicação em todos os momentos;

Aos irmãos (José Walter e Vladimir) e irmãs (Valdenira e Valdiclenia), pelo carinho, incentivo e apoio;

Ao amigo Neto, de maneira especial, pela ajuda, orientação e pela certeza da amizade sincera;

A todos que, de alguma forma, deram sua parcela de contribuição para a realização deste trabalho.

DEDICATÓRIA

**A Fernando Alex,
Pela compreensão,
companheirismo,
amizade,
paciência,
sinceridade
e amor.**

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	Ângulo de atrito interno
δ	Efetivo ângulo de atrito interno
ϕ_w	Ângulo de atrito do produto com a parede
$\Phi_{r\phi}$	Ângulo de repouso
ff	Fator fluxo de tremonha
FF	Função fluxo
ff_c	Índice de fluxo
γ	Densidade consolidada
C	Coesão
YL	Lugar geométrico de deslizamento
EYL	Efetivo lugar geométrico de deslizamento
H	Altura total do silo com tremonha
D	Diâmetro do corpo do silo
d	Diâmetro de partícula
H/D	Relação altura/diâmetro
σ_x	Pressão horizontal
σ_y	Pressão vertical
ε_y	Deformação vertical
ν	Coefficiente de Poisson referente à fase de descarregamento
ψ	Ângulo de dilatação
δ_d	Varição 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 confinada
μ	Coefficiente de atrito interno do produto com a parede

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Produção brasileira de cereais, leguminosas e oleaginosas	3
Figura 2	Silos verticais de fundo plano	4
Figura 3	Silos verticais	9
Figura 3.1	Silos horizontais	10
Figura 4	Geometria do silo	11
Figura 5	Classificação das células segundo o plano de ruptura	12
Figura 6	Tipos básicos de fluxos durante o descarregamento	13
Figura 7	Exemplos de silos quanto ao trajeto do fluxo	14
Figura 8	Forma mais comum de silos com tremonha	15
Figura 9	Representação do ângulo de repouso	20
Figura 10	Lugares geométricos e ângulos de atrito interno	26
Figura 11	Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede	27
Figura 12	Função Fluxo dos produtos	28
Figura 13	Funções fluxo típicas dos grãos	29
Figura 14	Determinação do fator fluxo	32
Figura 15	Jenike Shear Test	34
Figura 16	Sistema de Aquisição de dados Spider8	34
Figura 17	Curvas de Tensão, Pré cisalhamento e cisalhamento	34
Figura 18	Amostra do milho	35
Figura 19	Amostra do painço	35
Figura 20	Amostra do soja	35
Figura 21	Célula de cisalhamento direto e aparelho (TSG 70-140)	38
Figura 22	Lugares geométricos e ângulos de atrito interno	38
Figura 23	Comportamento do k em relação aos movimentos relativos da parede	51
Figura 24	Estado de tensões em uma fatia elementar do produto armazenado	54
Figura 25	Fator k para o milho segundo os especialistas	66
Figura 26	Fator k para o, milho segundo as normas internacionais	67
Figura 27	Fator k para painço segundo os especialistas	68
Figura 28	Fator k para painço segundo as normas internacionais	69

Figura 29	Fator k para soja segundo os especialistas	69
Figura 30	Fator k para soja segundo as normas internacionais	70
Figura 31	Deformação plástica	75
Figura 32	Tensão versus Deformação Elástica	75
Figura 33	Curva de tensão x deformação (σ x ϵ)	76
Figura 34	Efeito da dilatação em produto sólido	80
Figura 35	Diagrama de carga e descarga e orientação cartesiana	83
Figura 36	Célula de Carga Uniaxial	87
Figura 37	a) CCU apoiada na base b) Disposição dos pinos na base	87
Figura 38	a) Ensaio de Tração b) Curvas característica do ensaio de tração	88
Figura 39	Limpeza da superfície para aplicação do extensômetro	89
Figura 40	Procedimento de colagem do extensômetro	89
Figura 41	Aplicação de Silicone.	90
Figura 42	Sistema de aquisição de dados.	90
Figura 43	Relação métrica/elétrica capturada pelo Spider8	91
Figura 44	Relação mecânica/elétrica capturada pelo Spider8	91
Figura 45	Interface de configuração do Catman 4.5	92
Figura 46	Interface final de programação do Catman 4.5.	92
Figura 47	a) Computador ligado ao Spider e o equipamento de determinação das propriedades mecânicas b) Equipamento das propriedades mecânicas sobre a base da máquina de ensaio universal	93
Figura 48	a) Produto nivelado b) Ensaio em andamento	93
Figura 49	Ensaio em andamento máquina universal e o equipamento das propriedades mecânicas	94
Figura 50	Curvas de tensão x deformação dos grãos de milho com 10% de umidade	95
Figura 51	Curvas de tensão x deformação dos grãos de milho com 12% de umidade	95
Figura 52	Curvas de tensão x deformação dos grãos de milho com 14% de umidade	95
Figura 53	Módulo de Elasticidade Calculado para o milho	97
Figura 54	Módulo de Elasticidade Experimental para o milho	98
Figura 55	Ângulo de dilatação do milho (ψ)	100

Figura 56	Curvas de tensão x deformação dos grãos de milho com 10% de umidade	101
Figura 57	Curvas de tensão x deformação dos grãos de milho com 12% de umidade	101
Figura 58	Curvas de tensão x deformação dos grãos de milho com 14% de umidade	102
Figura 59	Módulo de Elasticidade Calculado para o milho	104
Figura 60	Módulo de Elasticidade Experimental para o milho	105
Figura 61	Ângulo de dilatação do milho (ψ)	106
Figura 62	Curvas de tensão x deformação dos grãos de soja com 10% de umidade	108
Figura 63	Curvas de tensão x deformação dos grãos de soja com 12% de umidade	108
Figura 63	Curvas de tensão x deformação dos grãos de soja com 14% de umidade	108
Figura 65	Módulo de Elasticidade Calculado para da soja	110
Figura 66	Módulo de Elasticidade Experimental para da soja	111
Figura 67	Ângulo de dilatação da soja (ψ)	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Classificação dos silos quanto à esbeltez	11
Tabela 2	Fatores que afetam as pressões nas paredes dos silos	19
Tabela 3	Fluxo dos produtos armazenáveis	23
Tabela 4	Classificação do índice de fluabilidade	33
Tabela 5	Níveis de cargas normais no ensaio de cisalhamento	39
Tabela 6	Análise granulométrica de grãos de milho	40
Tabela 7	Análise granulométrica de grãos de painço	41
Tabela 8	Análise granulométrica de grãos de soja	41
Tabela 9	Média dos ângulos de repouso dos grãos	42
Tabela 10	Teor de umidade, densidade consolidada e índice de fluxo	43
Tabela 11	Propriedades de fluxo dos grãos	45
Tabela 12	Ângulo de atrito com as paredes	47
Tabela 13	Valores limites de k para alguns produtos, de acordo com as principais normas	62
Tabela 14	Equações propostas por pesquisadores para o coeficiente k .	64
Tabela 15	Valores de k experimentalmente para o milho	65
Tabela 16	Coefficientes de Poisson de vários materiais	79
Tabela 17	Coefficiente de Poisson nas fases de Carregamento e Descarregamento para grãos de milho	96
Tabela 18	Coefficiente de Poisson nas fases de Carregamento e Descarregamento para grãos de painço	102
Tabela 19	Coefficiente de Poisson nas fases de Carregamento e Descarregamento para grãos de soja	109

RESUMO

A análise do comportamento das estruturas dos silos tem-se destacado nas diversas áreas de pesquisas relacionadas aos sistemas de armazenamento uma vez que não existe uma padronização do dimensionamento dessas estruturas. Colapsos e ruínas em silos podem ser atribuídos ao fato de que muitos projetistas associam o cálculo estrutural ao mesmo princípio de reservatório de líquido não considerando, porém, o atrito do produto armazenado com a parede do silo. A pesquisa teve como objetivo determinar as propriedades físicas, de fluxo e mecânicas de produtos granulares (milho, painço e soja), com os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.). Adotou-se, para determinação das propriedades de fluxo, a metodologia recomendada pela British Materials Handling Board – BMHB (1985) e para aquisição dos dados utilizou-se o equipamento de cisalhamento direto por translação TGS 70-140 “Jenike Shear Cell”. Para as propriedades mecânicas foi utilizada uma célula de compressão uniaxial com um conjunto de cargas de compressão de 5, 10, 15 e 20kN. Os resultados obtidos demonstraram que os grãos são caracterizados como fluxo fácil enquanto para o fator k experimental ($k_{exp.}$) e apresentaram valores superiores aos calculados pelas equações propostas pelos pesquisadores e pelas normas internacionais; para o coeficiente de Poisson calculado tanto para o carregamento quanto para o descarregamento, os valores foram superiores aos experimentais verificando-se aumento com o acréscimo do teor de umidade; em referência ao para o módulo de elasticidade experimental, demonstrou-se superior e, com o aumento do teor de umidade, ocorreu aumento dos valores nos módulos; quanto ao ângulo de dilatação, constatou-se redução nos resultados com o aumento do teor de umidade; enfim as curvas de tensão vertical (σ_y) versus deformação vertical (ε_y) apresentaram, para todos os ensaios, comportamento semelhante ao teórico.

Palavras-chave: Propriedades físico-mecânicas, grãos, silos, compressão uniaxial

ABSTRACT

Analyses of the structures of the silos has been highlighted in several areas of research related to storage systems, since there is no standardization of the design of these structures. Collapses and ruins in silos can be attributed to the fact that many designers combine the structural calculation of these the same principle fluid reservoir not considering, however, the friction of the stored product with the silo wall. . The research aimed to determine the physical, mechanical and flow of granular products (maize, millet and soybeans), with moisture contents of 10, 12 e14% (wb). Was adopted for determining the flow properties of the methodology recommended by the British Materials Handling Board - BMHB (1985) and data acquisition equipment used the direct shear by translation TGS 70-140 "Jenike Shear Cell. . For the mechanical properties was used a cell with a uniaxial compression set compression loads of 5, 10, 15, and 20kN. The results showed that the grains are characterized as easy flow, for the experimental factor k ($k_{exp.}$) presented higher values of calculated by the equations proposed by researchers and by international standards for the Poisson's ratio calculated for both charging as unloading, values were higher than the experimental occurring increase with increasing moisture content, the modulus of elasticity for this experiment and proved to be higher with increasing the moisture content of the values was an increase in the modules;, the angle of expansion was reduction in earnings with increasing moisture content. For the vertical stress curve (σ_y) versus vertical deformation (ϵ_y) showed, in all the tests, similar to the theoretical behavior.

Keywords: physical and mechanical properties, grain silos, uniaxial compression

SUMARIO

CAPITULO 1	
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	3
1.2 OBJETIVO	6
1.2.1 – Objetivo Geral	
1.2.2 – Objetivos Específicos	
CAPITULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2 - Revisão Bibliográfica	7
2.1- Silos: definições e conceitos	7
2.2 - Tipos de Silo	8
2.2.1 - Silo horizontal	8
2.2.2 - Silo vertical	9
2.3 - Classificação de silo	10
2.3.1 Quanto à geometria, o fluxo pode ter:	13
2.3. 2 Quanto ao tipo de fundo, os silos pode ter:	14
CAPITULO 3 - PROPRIEDADES FÍSICAS E DE FLUXO	16
3.1 Introdução	16
3.1.1 Grãos	16
3.1.1.1 Soja	16
3.1.1.2 Milho	16
3.1.1.3 Painço	17
3.2 Objeto Geral	17
3.2.1 Objetivos Específicos	17
3.3 Propriedades Físicas	18
3.3.1 Teor de umidade (γ)	21
3.3.2 Ângulo de repouso (θ_r)	21
3.3.3 Granulometria	23
3.4 Propriedades de Fluxo	24
3.4.1 Densidade do produto em função da consolidação	25
3.4.2 Ângulo de atrito interno (ϕ) e efetivo ângulo de atrito interno (δ)	26
3.4.3 Ângulo de atrito do produto com a parede (θ_w)	27

3.4.4 Função Fluxo (FF)	27
3.4.5 Fator Fluxo da Tremonha (ff)	30
3.4.6 - Índice de Fluxo (ff_c)	32
3.4.7 Aparelho de Cisalhamento de Jenike	33
4 MATERIAL E MÉTODOS	35
4.1 Produtos Utilizados nos Ensaios	35
4.2 Propriedades Analisadas	36
4.2.1. Propriedades Físicas	36
4.2.1.1. Ângulo de Repouso	36
4.2.1.2. Granulometria	36
4.2.1.3. Teor de umidade	37
4.3. Propriedades de Fluxo	37
5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E DE FLUXO	40
5.1 Propriedades Físicas	40
5.1.1 Granulometria	40
5.1.2 Ângulo de Repouso ($^{\circ}$)	41
5.1.3 Densidade Consolidada(γ)	42
5.1.4 Índice de Fluxo (ff_c)	44
5.1.5 Ângulo de atrito interno (ϕ), Efetivo ângulo de atrito interno (δ) e Coesão (C)	44
5.2 Conclusões	49
CAPITULO 6 - PARÂMETRO k	50
6.1 Parâmetro k	50
6.1.1 Generalidades	50
6.2 Objetivo Geral	53
6.3 Recomendações para o cálculo do k	53
6.5 Recomendação dos pesquisadores	56
6.5 Recomendação das normas internacionais para o cálculo do k	60
6.6 - Material e Métodos	63
6.7 Resultados e Discussões	67
6.8 Conclusões	68
CAPITULO 7 - PROPRIEDADES MECÂNICAS	66

7.1 Propriedades Mecânicas	66
7.1.1 Generalidades	66
7.2 Propriedades Mecânicas de Materiais Isotrópicos	67
7.2.1 Comportamento $\sigma \times \epsilon$	67
7.2.1.1 Deformação elástica	67
7.2.1.2 Deformação plástica	67
7.2.2 Comportamento $\sigma \times \epsilon$ - Deformação Elástica	68
7.3 Propriedades Mecânicas	70
7.3.1 Módulo de elasticidade (E)	70
7.3.2 Coeficiente de Poisson (ν)	71
7.3.3 Ângulo de dilatação (ψ)	72
7.4 Fatores que Afetam as Constantes Elásticas	73
7.5 Determinação de Propriedades Elásticas dos Materiais	73
7.6 Materiais e Métodos	75
7.6.1 Produtos Utilizados nos Ensaios	75
7.7. Confeção da Célula de Propriedades Mecânicas	78
7.8. Instrumentação e Aquisição de Dados	80
7.8.1. Extensômetros	80
7.8.2. Calibração dos sensores de deslocamento e de força	82
7.8.3 Programação do sistema de aquisição de dados	83
7.8.4. Procedimento experimental	84
7.8.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	85
7.8.5.1 – Milho	86
7.8.5.1.1 - Curvas de tensão x deformação para grãos de milho	86
7.8.5.1.2 - Coeficiente de Poisson dos grãos de milho	88
7.8.5.1.3- Módulo de elasticidade calculado (E) para os grãos de milho	89
7.8.5.1.4. Ângulo de dilatação dos grãos de milho (ψ)	91
7.8.5.2 Painço	92

7.8.5.2.1- Curvas de tensão x deformação para grãos de painço	92
7.8.5.2.2 - Coeficiente de Poisson dos grãos de painço	93
7.8.5.2.3- Módulo de elasticidade calculado (E) dos grãos de painço	95
7.8.5.2.4- Módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$) dos grãos de painço	95
7.8.5.2.5 Ângulo de dilatação do painço	97
7.8.5.3 Soja	98
7.8.5.3.1 Curvas de tensão x deformação para grãos de soja	98
7.8.5.3.2 - Coeficiente de Poisson dos grãos de soja	99
7.8.5.3.3 Módulo de elasticidade calculado (E) para os grãos de soja	100
7.8.5.3.4 Módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$) para grãos de soja	101
7.8.5.3.5 Ângulo de dilatação dos grãos de soja(ψ)	102
7.8.5.3.6 Conclusões	103
8. Referências Bibliográficas	104

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

Para o período 2012/2013 a produção nacional de grãos deve chegar a 180,41 milhões de toneladas, de acordo com o quarto levantamento divulgado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2013). O volume representa um aumento recorde de 8,6% ou 14,23 milhões de toneladas a mais do que a safra passada, que foi de 166,17 milhões.

A soja se destaca como produto de maior produção, com um aumento de 16,28 milhões de toneladas, atingindo 82,68 milhões de toneladas frente ao último estudo; já o milho primeira safra cresce 863,5 mil toneladas chegando a 34,73 milhões totalizando, com a segunda safra, 72,19 milhões de toneladas. O feijão primeira safra aumenta 58,9 mil toneladas e chega, juntamente com as demais safras, a 3,32 milhões de toneladas.

Com o movimento crescente da industrialização mundial em termos de capacidade e diversidade de produção, sentiu-se a necessidade de ressaltar a utilização dos silos dos campos para os pátios das indústrias englobando, a partir deste momento, a possibilidade de armazenamento de produtos oriundos de indústrias de fiação, de carburetos e aços, da construção civil e farmacêutica, entre outras.

Os silos são usados extensamente na indústria visando à utilização eficiente de espaço, conservação do estoque e abastecimento do processo de fabricação; contudo, são estruturas complexas de se projetar haja que vista que frequentemente, apresentaram problemas operacionais de vez que existem diferentes tipos de produtos que podem ser armazenados; esses impasses ocorrem nos sistemas nos quais as estruturas são projetadas sem conhecimento das características relevantes do fluxo do produto a ser armazenado.

Silos são construções destinadas ao armazenamento de produtos granulares ou pulverulentos a granel, tipicamente utilizados na indústria, na agricultura, na siderurgia e em portos, entre outros, razão pela qual podem ser construídos com os mais diversos materiais, como concreto armado, aço, madeira, argamassa armada etc., porém os mais utilizados atualmente na agricultura são silos metálicos com chapa corrugada.

Recomenda-se, como prevenção aos problemas de fluxo, investigação ampla das propriedades físicas e de fluxo dos produtos que serão utilizados. Somente desta forma será possível prever o tipo de fluxo mais adequado dos produtos armazenáveis em

silos e evitar obstruções na descarga, maximizando operações de descargas, transilagem, dosagem e empacotamento (Juliano et al., 2005).

Jenike e Johanson (1968) relatam que os primeiros grandes silos foram construídos em 1860 para o armazenamento de grãos; desde então, milhares de grandes e pequenos silos têm sido construídos para o armazenamento de uma extensa variedade de produtos como grãos, pós, torrões, fibras etc.

Inicialmente, o projeto de silos era feito considerando-se a pressão horizontal hidrostática do grão, exatamente igual à dos líquidos ($p = \gamma h$) porém os resultados experimentais de Roberts (1884) em modelos de escala reduzida, mostraram que as pressões nas paredes não aumentavam linearmente com a profundidade mas que parte do peso do produto era transferida às paredes por atrito.

Segundo Janssen (1895), o material granular entra em contato com as paredes do silo, transmitindo parte de seu peso por atrito diminuindo a pressão vertical e, portanto os empuxos.

Em 1895 Janssen, a partir do equilíbrio estático das forças em uma parte elementar do produto armazenado, elaborou a primeira formulação para o cálculo das pressões em silos; desde então, esta teoria passou a ser utilizada principalmente pelos códigos normativos estrangeiros.

A determinação das propriedades de fluxo do material a ser armazenado de um projeto de silos é fundamental sendo que a etapa inicial para determinação do fluxo no silo, deve ser realizada nas condições mais severas daquelas que podem ocorrer no silo.

A necessidade de se aumentar a capacidade de armazenamento e de atender às solicitações das empresas de processamento, demonstra a importância do estudo da problemática de unidades armazenadoras para o desenvolvimento de novas tecnologias e solução dos já existentes.

A demanda por silo é explicada, portanto, pela carência das cooperativas, produtores e indústrias de armazenarem grandes quantidades de produtos em espaços reduzidos; além disto, a estocagem se torna importante em termos econômicos, na medida em que permite o controle do escoamento da safra e abastecimento, reduzindo a indisponibilidade de importação, tanto quanto, também, das especulações de mercado.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os silos verticais são largamente utilizados na agricultura, indústria e mineração; portanto, de fundamental importância para o armazenamento dos produtos advindos desses setores.

Acredita-se que o Brasil, apesar de ser um dos maiores produtores de grãos do mundo, possui apenas 1/3 de sua capacidade de armazenamento. A demanda por silos pode ser explicada devido às necessidades de cooperativas, produtores e indústrias, no sentido de armazenarem grandes quantidades de produtos em espaços reduzidos.

A estocagem em silos torna-se imprescindível também, em termos econômicos, haja vista que permite um controle maior do escoamento da safra, além de abastecimento reduzindo, assim, a necessidade de importação e evitando as especulações de mercado.

O Brasil, por se tratar de um dos maiores produtores de grãos do mundo e ser um país que desempenha papel fundamental na economia mundial, não pode ter sua capacidade de armazenamento prejudicada em virtude do desconhecimento das ações atuantes nas estruturas de armazenamento, sentido no qual este estudo contribuirá, sem dúvida, para a elaboração de recomendações normativas e respeito das ações em silos com descarga excêntrica visando ao desenvolvimento de uma futura norma que considere as condições reais de armazenagem em nosso país (Figura 1).

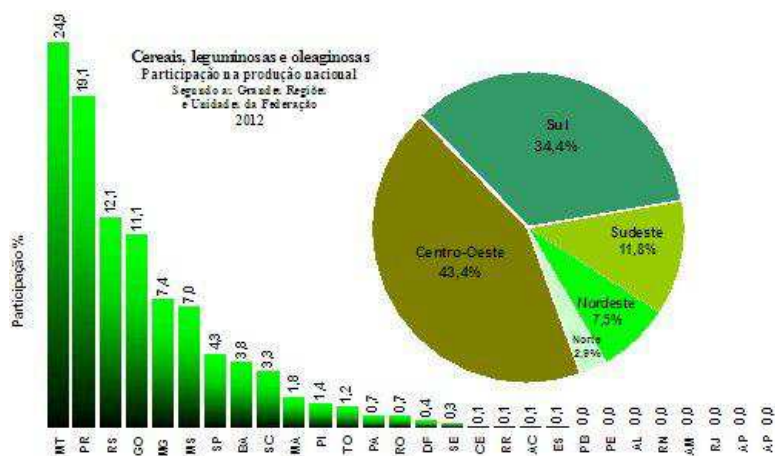


Figura 1 – Produção do Brasil de cereais, leguminosas e oleaginosas

Os silos são estruturas difíceis de projetar com relação às pressões e fluxo contínuo e como estruturas seguras e econômicas, devido à grande variabilidade das

propriedades dos produtos armazenados. Esses tipos de estrutura apresentam um dos mais altos índices de ruínas e colapsos, o que estimula novas investigações sobre as pressões que o produto armazenado exerce sobre a estrutura.

Os silos verticais são bastante utilizados na agricultura, na indústria e na mineração; portanto, são de suma relevância para o armazenamento dos produtos advindos desses setores (Figura 2).



Figura 2 – Silos verticais

Ravenet (1983) já preconizava que para se efetuar o projeto de um silo com a máxima garantia de funcionabilidade, é imprescindível que fatores como tipo de produto a se armazenar e características geométricas do silo exigido para o processo industrial, sejam levados em consideração.

Aliadas aos problemas de fluxo, as ações exercidas pelo produto armazenado nas paredes e base dos silos e sua enorme variabilidade, complementam a complexidade desse tema. Diante dessa problemática, diversos estudos têm sido realizados sobre o comportamento dos sólidos no interior do silo, no que se refere às condições de carregamento, estocagem e descarregamento e seus efeitos, nas partes dos silos.

É provável que os desastres acima comentados tenham sido causados, em sua maioria, pela imperfeita compreensão ou total falta de conhecimento a respeito do comportamento dos produtos no silo, das forças que agem sobre esse tipo de construção, de seus agentes causais e formas de prevenção.

Sabe-se que, ao carregar ou descarregar um silo, determinada porção da força vertical que atua perpendicularmente ao fundo do silo, é absorvida pelas paredes, por atrito, o qual é responsável por gerar tensões de compressão adicionais à estrutura e, por conseguinte, possíveis deformações locais (Brown, Lahlouh e Rotter, 2000). No entanto, as forças de atrito que ocorrem paralelamente às paredes dos silos têm sido, de certa

forma, negligenciadas pelos estudiosos, uma vez que o estudo das forças horizontais e verticais nos silos é mais atraente em razão das suas intensidades e seus efeitos à estrutura dos silos, serem significativamente maiores e mais imediatos.

As forças de atrito em silos são consideradas, em magnitude, significativamente inferiores às forças horizontais e verticais mas não menos importantes; elas podem, em um contexto amplo, não serem ponderadas como as principais causas de falhas estruturais nas paredes dos silos fato este atribuído às forças horizontais porém são responsáveis por gerar deformações localizadas, o que determina o enfraquecimento das paredes tornando-as frágeis e sem condições de suportar os demais esforços.

A parede de um silo projetado para suportar grandes forças horizontais pode, necessariamente, suportar forças de atrito significativamente menores que as horizontais pois são dois tipos de esforço diferentes em sua concepção. As forças de atrito solicitam as seções longitudinais das paredes dos silos com cargas de compressão, enquanto as forças horizontais geram reações de tração nas seções longitudinais das paredes.

Como agravante, Brown, Lahlouh e Rotter (2000) ainda completam que as imperfeições das paredes e a excentricidade de carga e descarga, contribuem para o desenvolvimento de ações não uniformes ao longo da profundidade dos silos o que, para o caso das forças de atrito, pode ocasionar o surgimento de momentos fletores diametrais. Para o caso das forças verticais não uniformes podem surgir momentos fletores no fundo do silo, o que aumentaria os riscos de fratura e tombamento.

Este cenário refletia, há algum tempo, a necessidade de realização de uma análise minuciosa da distribuição e intensidade da interação forças de atrito nas paredes – forças verticais no fundo de um silo vertical; desta forma, silos corretamente projetados para suportar essas ações estariam, também, menos susceptíveis ao colapso parcial ou total.

O Brasil ainda não possui uma norma específica para o projeto e construção de silos; daí a importância do presente estudo, já que o mesmo poderá contribuir para a elaboração da futura norma com um dos parâmetros essenciais no cálculo das pressões em silos, tornando o Brasil mais competitivo no setor de armazenamento internacional.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

- ✓ Determinar as propriedades físicas, de fluxo e mecânicas, de produtos granulares agroindustriais.

Capítulo 2

2. Revisão Bibliográfica

2.1 - Silos: definições e conceitos

Os silos são estruturas bastante usadas ao longo da história de armazenamento de todo tipo de produtos agrícolas e industriais. A partir do século XIX ocorre um aumento não só no número de silos existentes mas também em suas dimensões e, como consequência, o número de acidentes cresceu resultando no aprofundamento dos estudos sobre o comportamento estrutural para reduzir perdas econômicas e humanas.

Na teoria de Coulomb, publicada em 1776, foi considerada a existência de atrito entre o produto e a parede de contenção, admitindo-se que o maciço está em estado ativo.

Rankine publicou, em 1857, uma teoria na qual analisa o estado de tensão em um maciço granular, fofo, não coesivo e semi-infinito. Os estudos de Janssen (1895) resultaram na dedução de uma equação para cálculo das pressões nas paredes dos silos sendo que, atualmente, sua teoria ainda é recomendada para condições estáticas. Em 1897 Airy desenvolveu uma teoria para o cálculo da força horizontal nas paredes aplicando, no cálculo de silos de madeira, aço e concreto armado. A teoria de Walker (1966) fornece as tensões na massa do produto granular ou pulverulento em tremonhas e os fatores críticos que asseguram a continuidade do fluxo gravitacional. As pesquisas desenvolvidas por Jenike e Johanson (1968) contribuíram para melhorar o conhecimento sobre o movimento do produto no interior dos silos. Walters (1973) aprofundou os estudos de Walker (1966) analisando as tensões desenvolvidas durante o carregamento e aquelas durante a descarga nas paredes verticais dos silos.

Denomina-se silo a toda construção destinada ao armazenamento de produtos sólidos; entretanto, esta definição sempre esteve associada à ideia de depósito agrícola cuja única finalidade seria estocar e conservar apenas cereais e forragens.

Freitas (2001) define silo como sendo um termo genérico indicado para designar toda e qualquer construção cuja finalidade seja armazenar produtos granulares ou pulverulentos, podendo a mesma ser equipada com dispositivos de carregamento e que seja capaz de ser esvaziada por gravidade, preferencialmente, ou através de meios mecânicos ou pneumáticos.

Internacionalmente, os silos recebem inúmeras denominações em que, as mais comuns são “bins” e “bunkers” cujas definições se apresentam bastante confusas e variadas de acordo com o país ou autor que as utilize. Safarian e Harris (1985) afirmam que os termos *silos*, “bin” e “bunker” possuem diferentes significados em diversas partes do mundo e variam de autor para autor. Nos Estados Unidos, por exemplo, o termo “bin” engloba ambas as denominações *silos* e “bunker” fazendo-se uma pequena subdivisão ao nomear *silos* àquele “bin” cuja relação altura/diâmetro seja elevada e “bunker” aquele de baixa relação altura/diâmetro.

Segundo Guane Zhang (2005), os problemas relacionados aos silos podem ser classificados em duas categorias: em falhas estruturais (flambagem, colapso estrutural, problemas de fundação) e falhas funcionais (formação de arcos, efeito tubo, segregação e explosão). Dentre os principais problemas funcionais se destaca a formação de arcos coesivos capazes de restringir, parcial ou completamente, a descarga, estando sua ocorrência relacionada às geometrias dos silos e às tremonhas (DRESCHER et al., 1995).

2.2 Tipos de Silo

2.2.1 - Silo horizontal

São grandes os depósitos horizontais cobertos de formato cônico. O depósito de material é realizado ao longo do cume da cobertura e os grãos são acumulados em forma de pirâmide; a descarga do silo é feita por um sistema de transportadores situados a nível do piso.

Devido à não existência de códigos normativos brasileiros muitas denominações são dadas para este tipo de estrutura existindo, ainda, algumas controvérsias sobre a terminologia a ser adotada. Em algumas regiões essas unidades são chamadas armazéns graneleiros ou simplesmente graneleiros. A denominação armazém surgiu com a utilização das unidades destinadas para o armazenamento de café em sacarias. Algumas dessas unidades foram adaptadas para estocar produtos a granel. WEBER (1995), classifica essas unidades como armazéns granelizados. Com as inovações construtivas adaptadas aos projetos originais e a otimização das condições de armazenamento e processamento, tais unidades passaram a ter fundo inclinado no formato V, duplo V e triplo V e ainda semiplano. Com a instalação de cabos de termometria para controle da

aeração e umidade da massa de grãos, mencionadas estruturas passaram a ter “status” de silo. Negrisoli (1997), emprega a terminologia “silos horizontais” apenas para as unidades elevadas enquanto as demais são denominadas armazéns graneleiros ou simplesmente graneleiros (Figura 3).



Figura 3(a) - Silo horizontal

Fonte: <http://www.ceagesp.gov.br>

2.2.2 Silo vertical

São silos cilíndricos, construídos em concreto ou em chapa de aço; a área ocupada é relativamente pequena haja vista que as dimensões de altura são, muitas vezes, maiores que as de seu diâmetro; possuem capacidade de armazenar de 4 a 6 mil toneladas de grãos e são recomendados para grãos de soja que escoam facilmente e sementes de algodão ou amendoim são adequadamente estocadas em silos verticais.

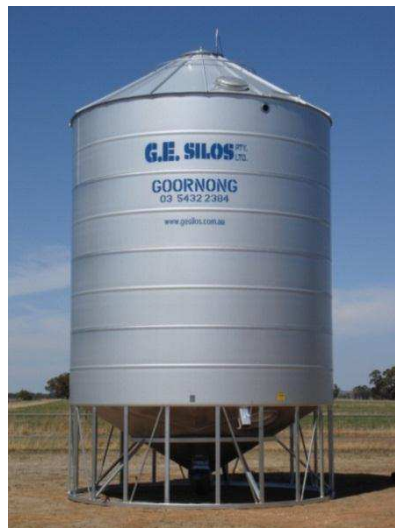


Figura 3 (b) - Silo vertical
 Fonte: <http://www.gesilos.com.au>

2.3 - Classificação de silo

Segundo as normas internacionais, os silos podem ser classificados de acordo com as seguintes características:

- geometria do silo
- tipo de fluxo durante o descarregamento
- geometria do fluxo
- tipo de fundo

Em relação à geometria, os silos são classificados segundo a relação entre a altura efetiva do produto armazenado (h) e o maior diâmetro inscrito (d); no entanto, as normas estrangeiras não são unânimes em relação a essa classificação, como indica a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos silos quanto à esbeltez

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

H – Altura total do silo com a tremonha; D – Diâmetro do corpo do silo; – Não possui classificação.
 Fonte: Calil Junior (2007)

Conforme Safarian e Harris (1985), entre os pesquisadores também não há consenso em relação ao que seja uma célula alta ou baixa; alguns fazem esta classificação em relação às proporções da célula e outros baseados na posição do plano de ruptura do produto; em geral, a relação $H/D < 1,5$, onde H é a altura e D o diâmetro ou lado da célula, classifica a célula como baixa e, caso contrário, como alta, Figura 4.

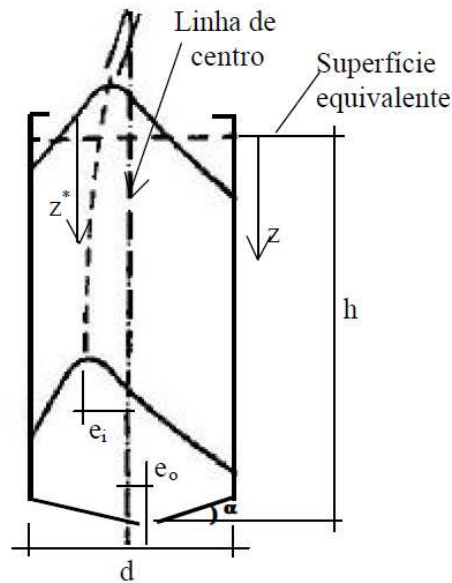


Figura 4 – Geometria do silo

h – distância da superfície equivalente até a saída

z – profundidade a partir da superfície equivalente

d – diâmetro da seção transversal característica

e_i – excentricidade de carregamento

e_o - excentricidade da boca de descarga

α - ângulo de inclinação do fundo do silo

z^* - profundidade local

Superfície equivalente – nível de superfície plana que se obtém para um mesmo nível de produto armazenado.

A classificação quanto ao plano de ruptura, é dada pela teoria de Coulomb; não levando em conta o atrito com a parede para o caso de uma parede vertical e superfície de topo horizontal, o plano de ruptura de Coulomb está entre o ângulo de repouso (ϕ_r) e

a parede vertical. De acordo com Safarian e Harris (1985) o ângulo de ruptura deveria ser dado por $(45 - \phi_r/3)$ em lugar da definição clássica $(45 - \phi_r/2)$, ambos indicados na Figura 5; se o plano de ruptura intercepta o topo da superfície do produto armazenado a célula é considerada baixa; caso contrário, é considerada alta.

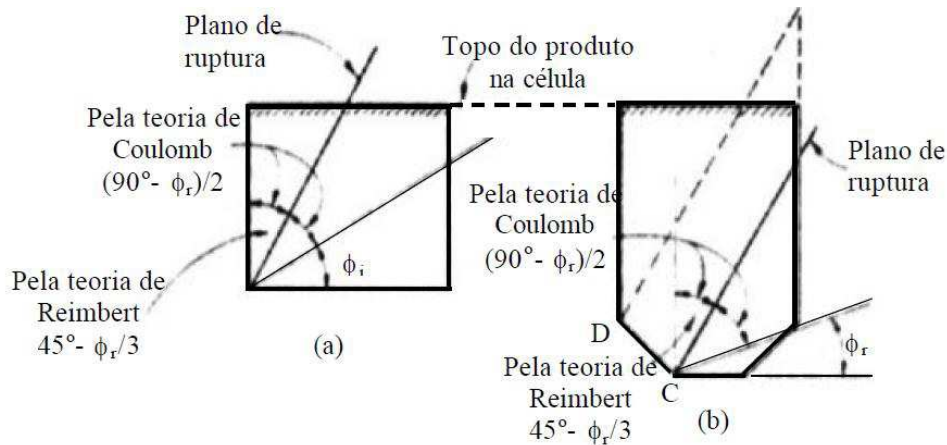


Figura 5 – Classificação das células, segundo o plano de ruptura

Muitos projetistas, porém, não concordam com o local do plano de ruptura; alguns começariam o plano no fundo da tremonha, ponto C da Figura 3(b), enquanto outros passariam isto para o ponto D, no fundo da parede vertical; assim e através de uma interpretação, a célula seria considerada alta e, pela outra, baixa.

Felizmente, para tais casos incertos, classificação exata não é crítica (SAFARIAN e HARRIS, 1985).

As estruturas baixas para armazenamento de produtos a granel, coesivos ou não, são denominadas, na língua inglesa, squats; a denominação se silos se refere em geral, a células altas.

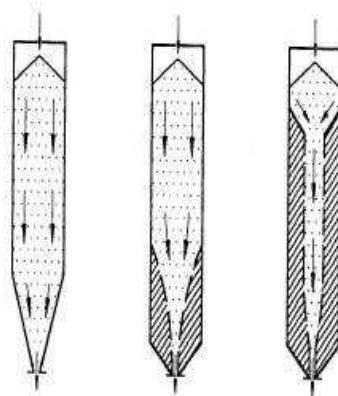
O tipo de fluxo caracteriza o descarregamento do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de produto sem movimento e se o silo pode ser esvaziado completamente. Determina também a distribuição das pressões nas paredes do silo e fundação e a integridade e custo da construção (CALIL JÚNIOR, 1997).

O modo como um produto fluirá por gravidade em um silo, é governado, por um lado, pelas próprias propriedades físicas do produto e, por outro, pela geometria e estrutura da superfície (atrito com a parede) da tremonha; em geral, podem ser distinguidos dois tipos principais de fluxo: fluxo de massa e fluxo de funil.

(a) Fluxo de massa: fluxo no qual todas as partículas armazenadas estão em movimento do começo até o fim do descarregamento.

(b) Fluxo de funil: caracterizado pela formação de um canal de partículas em movimento dentro de uma zona limitada enquanto o produto adjacente à parede permanece estacionário.

A Figura 6 ilustra os tipos de fluxo durante o descarregamento



(a) Fluxo de massa (b) Fluxo de funil

Figura 6 - Tipos básicos de fluxo durante o descarregamento

2.3.1 Quanto à geometria, o fluxo pode ter

(a) Trajeto assimétrico: o centro de gravidade do produto fluindo coincide com o eixo vertical do silo; por exemplo, silo circular com abertura de descarga concêntrica (Figura 7 (a)).

(b) Trajeto planar: É um fluxo uniforme que ocorre em silos de seção transversal retangular ou quadrada, com tremonhas em forma de cunha, em que uma das dimensões da boca de saída é paralela e de igual comprimento às paredes do silo, caso em que o canal do fluxo é simétrico em relação ao plano que passa pelo eixo longitudinal da abertura de saída (Figura 7 (b)).

(c) Trajeto excêntrico: o canal do fluxo não é simétrico em relação ao eixo vertical do silo nem quanto ao plano vertical que passa pelo eixo longitudinal do silo (Figura 7(c)).

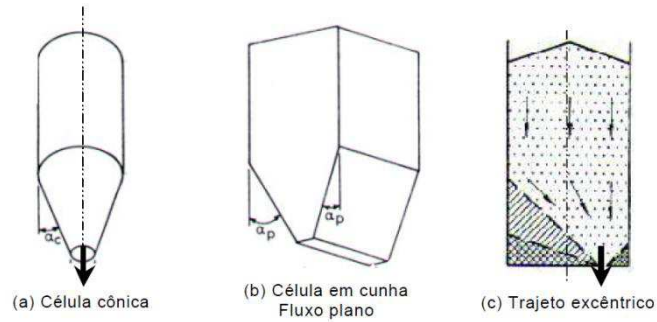
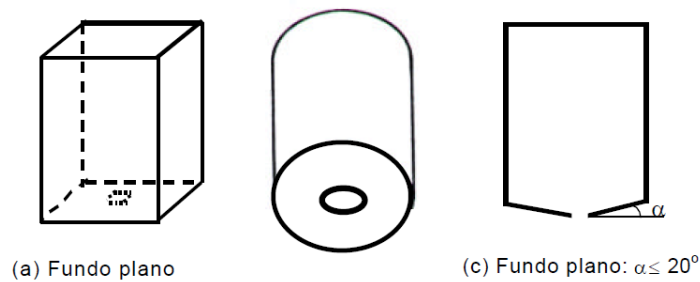


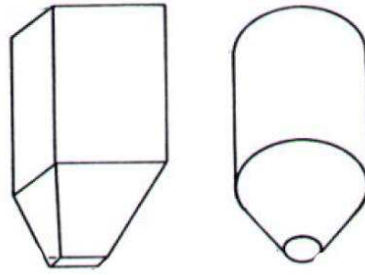
Figura 7 – Variação geométrica dos silos e sua influência no fluxo (AS 3374,1996)

2.3. 2 Quanto ao tipo de fundo, os silos podem ter

- (a) fundo plano: silo de fundo horizontal ou um fundo com paredes inclinadas de um ângulo a 20° com relação ao horizontal.



- (b) fundo com tremonha: fundo em forma de funil cujas formas mais comuns são as tronco-piramidais, Figura 8(a) e as tronco-cônicas, Figura 8(b).



(a) Tremonha piramidal (b) Tremonha cônica

Figura 8 – Forma mais comum de silos com tremonha

Capítulo 3

3. Propriedades Físicas e de Fluxo

3.1 Introdução

3.1.1 Grãos

3.1.1.1 Soja

A soja (*Glycinemax L.*) Merrill) é uma leguminosa rica em proteínas, cultivada como alimento tanto para humanos quanto para animais. A soja, pertencente à família *Fabaceae* (*Leguminosae*) é originária da China e do Japão. Os maiores produtores mundiais são Estados Unidos, Brasil, Argentina, China e Índia. O grão de soja possui formato geométrico de esferoide (KASHANINEJAD et al., 2008).

3.1.1.2 Milho

O milho (*Zeamays*), também chamado abati, auati e avati, é um conhecido cereal cultivado em grande parte do mundo. No Brasil, terceiro maior produtor mundial, o milho é usado tanto diretamente como alimento quanto para usos alternativos; a maior parte de sua produção é utilizada como ração de bovinos, suínos, aves e peixes; atualmente, apenas cerca de quinze por cento da produção brasileira se destinam ao consumo humano e, mesmo assim, de maneira indireta na composição de outros produtos devido, provavelmente, à falta de informações sobre o milho, suas qualidades e ao costume culinário brasileiro de se utilizar mais os grãos de arroz e feijão.

Ao lado da soja a cultura de milho é uma das pontas de lança da recente expansão da atividade agrícola brasileira. Seu cultivo é altamente beneficiado pela tecnologia e pelas inovações da pesquisa agrícola constituindo-se também um dos principais casos de sucesso da chamada revolução verde. Além dos benefícios óbvios decorrentes da exportação (como a geração de divisas para o país), a cultura de milho adquire importância estratégica quando se leva em conta a vantagem de mercado que uma grande produção nacional de milho traz para atividades agrícolas que usam a ração animal como base, como a bovinocultura, a avicultura, a suinocultura e até a piscicultura.

Os estados líderes na produção de milho são Paraná e Mato Grosso; agora, devido ao seu alto prestígio no agronegócio, o milho também é uma das culturas mais cultivadas pela agricultura familiar brasileira, seja para a subsistência ou para venda local.

3.1.1.3 Painço

O painço (*Panicummiliaceum*L.) foi uma das culturas mais antigas domesticadas pelo homem (KARAM et al., 2004; KALINOVA e MOUDRY, 2006; LU et al., 2009). Atualmente, é bastante cultivado no Leste da Europa, Rússia, China, Índia e América do Norte, para alimentação humana e animal (KARAM et al., 2004; LU et al., 2009).

No Brasil, o painço ainda é pouco cultivado quando comparado com as culturas tradicionais porém nos últimos anos vem despertando interesse em algumas regiões do Estado de São Paulo e Mato Grosso do Sul, onde é cultivado com o objetivo de exploração dos grãos para utilização na alimentação animal, principalmente de pássaros em cativeiro substituindo o alpiste (ZANCANELLA et al., 2003), na indústria cervejeira, misturado em pequena proporção com a cevada (Lima et al., 2000) e como espécie produtora de palha para o sistema plantio direto e adubo verde (ZANCANELLA et al., 2006).

3.2 Objetivo Geral

Determinar as propriedades físicas e de fluxo de produtos granulares agroindustriais.

3.2.1 Objetivos Específicos

- ✓ Caracterizar fisicamente os produtos granulares escolhidos para os ensaios;
- ✓ Comparar os resultados de propriedades de fluxo obtidos experimentalmente com os recomendados pelas principais normas internacionais de silos;

3.3 Propriedades Físicas

No Brasil o conceito de armazenagem se resume a simples ação da permanência do produto na unidade armazenadora levando-se em consideração apenas variáveis como teor de umidade, volume da massa armazenada, temperatura interna, aeração e tempo de armazenagem. Pouca importância é reservada ao fato de que seu conceito se torna mais abrangente no momento em que o produto a ser armazenado, diferentemente dos grãos, possui característica pulverulenta, como no caso de rações animais, cimentos, metais pulverizados, produtos químicos e farmacêuticos, leites, farinhas, floculados, etc, caso em que as ações de carga, armazenagem propriamente dita e descarga, passam a ser governadas pela inter-relação entre as propriedades físicas e de fluxo dos sólidos e entre as características geométricas das unidades armazenadoras.

Os silos são estruturas sujeitas a uma série de ciclos de carregamento – armazenamento – descarga, produzindo uma distribuição das pressões nas paredes dependentes da interação de alguns fatores; as medidas desses parâmetros a serem consideradas estão sujeitas às variações espaciais e temporais. A interação dos parâmetros produz um tipo de tensão no produto armazenado durante o carregamento e o armazenamento, que afeta a grandeza e a distribuição das pressões nas paredes do silo e na massa dos produtos (CHEUNG e CALIL JÚNIOR, 2006).

De acordo com HEZEL (2007), diversos autores vêm estudando o comportamento dessas propriedades nas fases de operação de um silo e procedimentos para sua determinação. Conforme SILVA (1993) a variabilidade espacial e temporária das pressões devidas aos produtos armazenados em silos, impede que sejam calculadas, com precisão absoluta. Com o intuito de caracterizar os principais fatores que afetam as medições das pressões são mostrados, na Tabela 2, os mensuráveis os quais podem, durante a condução dos ensaios, serem alterados.

Tabela 2 – Fatores que afetam as pressões nas paredes dos silos

Propriedades dos produtos armazenados	Característica dos silos(sistema)	Modos de operação (ações)
Peso específico	Altura de carga	Vazão de carga
Ângulo de atrito interno	Seção transversal	Vazão de descarga
Ângulo de atrito com a parede	Geometria da descarga	Fluxo
Forma, dimensão e distribuição da partícula	Obstruções internas	Carregamento

Resistência elástica e cisalhante	Rigidez na parede	Descarga
Coesão	Rugosidade da parede	Excentricidade de carregamento
Consolidação		Excentricidade de descarga
Umidade		
Temperatura		

Fonte: Calil Júnior (1990)

JULIANO et al. (2006) citam que as propriedades de fluxo são responsáveis por determinar o comportamento dos produtos armazenáveis em silos, tremonhas e transportadores; desta forma, é possível maximizar operações como descargas, transilagem, dosagem e empacotamento (KNOWLTON et al., 1994) e evitar insegurança no tipo de fluxo e surgimento de obstrutores de saída.

As características dos sólidos apresentam grande influência nas pressões exercidas nas paredes e no fundo de um silo, tal como no tipo de fluxo que ocorre; entretanto, pouco se conhece sobre as reais propriedades influentes e seus valores.

Dentre os fatores que influenciam o fluxo de produtos sólidos em condição de armazenagem, se destacam a dimensão das partículas, a temperatura, o teor de umidade do produto e o tempo de armazenamento (CALIL JÚNIOR, 1984).

Segundo Calil Júnior (1990) o fluxo de um sólido decresce com o aumento do teor de umidade que alcança o valor máximo de aproximadamente 80 a 90% de saturação; acima deste teor de umidade o sólido adquire propriedades viscosas e testes de cisalhamento não podem ser aplicáveis.

A determinação das propriedades de fluxo é importante por afetar, intrinsecamente, o comportamento do sólido durante a armazenagem, movimentação e processamento (FITZPATRICK et al., 2004).

Erroneamente, associa-se o comportamento dos sólidos nos silos aos de líquidos cujos mecanismos de fluxo se diferem bastante entre si. Roberts (1987) descreve que sólidos podem transferir esforços de cisalhamento quando em condição estática; que, quando comprimidos, desenvolvem coesão conservando sua forma e os esforços de cisalhamento são dependentes das pressões atuantes no sólido; para líquidos, os esforços dependem da razão de cisalhamento e não das pressões.

A caracterização do produto a ser armazenado consiste em determinar suas propriedades físicas. É o primeiro passo para o projeto de fluxo do produto e cálculo estrutural dos silos devendo ser realizado em condições mais severas daquelas que podem ocorrer no silo (FREITAS, 2001).

Calil Júnior (1997) propõe, de acordo com a norma australiana AS (1996) que, em termos de projeto, deverão ser determinados dois limites para cada parâmetro, de modo a delimitar sua faixa de variação e, com isto, se obter as combinações mais desfavoráveis para cada caso; referidos limites são o menor valor possível (limite inferior) e o maior valor possível (limite superior) para o parâmetro considerado durante a vida útil do silo; portanto, para serem determinadas as propriedades físicas dos produtos a granel armazenados é oportuno que se conheçam os lugares geométricos de deslizamento os quais são determinados pela relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal do produto armazenado, avaliando-se como ele desliza em relação a si próprio e com o material da parede. Para se obter essas informações são empregados testes laboratoriais com células de cisalhamento direto.

Com o aparelho de Jenike a determinação das propriedades de fluxo, de produtos coesivos ou não, e o desenvolvimento dos critérios de projeto, dependem do conhecimento do lugar geométrico da tensão de cisalhamento versus tensão normal para o produto deslizando sobre si mesmo e sobre a parede do silo. Por meio deste equipamento pode-se determinar a tensão à qual o produto estará sujeito durante o armazenamento e as condições de fluxo previstas para acontecer no silo (CALIL JÚNIOR, 1990). Desta forma, pode-se determinar os seguintes parâmetros: ângulo de atrito interno (ϕ); efetivo ângulo de atrito interno (δ) e ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w), coesão(c); peso específico (γ) e função fluxo instantânea (FF).

De acordo com Cheung (2007) a célula de cisalhamento de Jenike é um dos aparelhos com maior precisão para determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados.

3.3.1 Teor de umidade (γ)

O fluxo de um sólido decresce com o aumento do teor de umidade alcançando o valor máximo de aproximadamente 80 a 90% de saturação. Acima deste teor de umidade o sólido adquire propriedades viscosas e testes de cisalhamento podem ser inaplicáveis (CALIL JUNIOR, 1990).

Para testes de fluxo a amostra deve, entretanto, ser a mais úmida que possa ser encontrada em uso e durante os testes a amostra e a célula de cisalhamento devem ser manipuladas rapidamente para minimizar erros devidos à evaporação. Esta inconveniência na manipulação pode ser minimizada mantendo-se a sala dos testes em alta umidade relativa. O atrito na parede para o cálculo das pressões deve ser determinado utilizando-se o produto o mais seco e o mais úmido que possa ser usado (CALIL JÚNIOR, 1990).

3.3.2 Ângulo de repouso (θ_r)

O ângulo de repouso (θ_r) ou ângulo de talude natural, é medido pelo amontoado de produto granular ou pulverulento, formado pelo seu basculamento sobre uma superfície plana. Desta forma, o ângulo formado pela superfície livre com o plano horizontal é o ângulo de repouso do produto. Para que o ângulo de repouso esteja em equilíbrio é necessário que o produto situado na superfície também se encontre em equilíbrio estático. Segundo Gomes (2001), o ângulo de repouso se diferencia do ângulo de atrito interno em função das pressões impostas. O aumento das pressões de confinamento tornará a massa de grãos mais densa com menor índice de vazios aumentando, assim, o ângulo de atrito interno sendo este normalmente maior que o ângulo de repouso; já Gaylord e Gaylord (1984) mencionam que, trabalhando com produtos granulares, o ângulo de repouso equivale ao ângulo de atrito interno.

Quanto maior é o ângulo de repouso maior também será a capacidade de armazenamento dos silos e das correias transportadoras; por outro lado, quanto menor o ângulo de repouso do produto maior será seu fluxo de escoamento (PUZZI, 2000).

Ângulo de talude ou de repouso é aquele formado entre a superfície da massa de grãos e o plano horizontal, quando descarregados numa superfície plana. Alguns grãos tendem a ocupar a maior área possível, formando ângulo de talude horizontal pequeno e outros não. Isto se deve às propriedades intrínseca dos grãos, a fatores ambientais e de manejo na etapa de produção, e na lavoura, e de operações de pós-colheita. Formato, dimensões, tegumento, integridade física; integridade biológica, integridade sanitária; impurezas, matérias estranhas e umidade (a água confere adesividade à superfície) são fatores que fazem variar o ângulo de talude dos grãos. Os menores ângulos de talude ocorrem em grãos esféricos, grandes, lisos, sadios, íntegros, limpos e secos (ELIAS, 2008).

O conhecimento do ângulo de talude dos grãos é importante para determinação da capacidade estática dos silos, da capacidade de correias transportadoras e do dimensionamento de moegas, canaletas e rampas de descarga de grãos visto que grãos que formam ângulo de talude pequeno exercem maior pressão sobre as paredes, quando armazenados a granel.

O ângulo de repouso (θ_r) foi determinado através da queda livre de uma porção do produto em uma superfície rugosa; com sua queda, um volume foi formado; mediu-se, então, o ângulo que as paredes deste volume formavam com o plano horizontal (Figura 9).

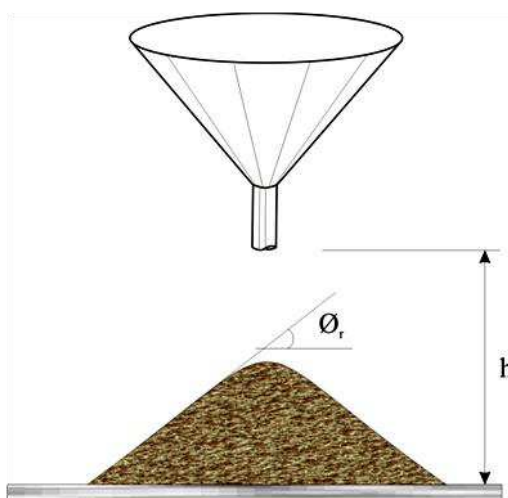


Figura 9 - Representação do ângulo de repouso

Calil Júnior e Cheung (2007) o ângulo de repouso pode inferir sobre o ângulo de atrito interno e o fluxo do produto, sendo um indicativo do potencial do produto em fluir.

Na Tabela 3 se encontra a classificação de Gaylord e Gaylord (1984) da fluabilidade (escoabilidade) do produto pela análise do ângulo de repouso; apesar da utilização do ângulo de repouso para a classificação do tipo de fluxo não ser recomendada atualmente, ele é utilizado apenas para o cálculo da formação do cone da cobertura superior formado pelo produto.

Tabela 3 - Fluxo dos produtos armazenáveis (Gaylorde e Gaylord, 1984)

Ângulo de repouso (θ_r °)	Produto/Tipo de fluxo
25 a 30	Produto granular/Fluxo livre

30 a 38	Produto granular/Fluxo fácil
38 a 45	Produto pulverulento/Instabilidade no tipo de fluxo
45 a 55	Pós coesivos/Podem requerer equipamentos especiais
55 a 70	Pós muito coesivos/Requerem equipamentos especiais

3.3.3 Granulometria

A análise da granulometria de um produto é relevante visto que o estudo dos resultados indica a relação de fluabilidade e a capacidade das partículas finas de formar arcos, em comparação com o fluxo livre das partículas granulares (CALIL JUNIOR, 1984).

Como regra geral, os produtos que não contêm partículas menores que 0,25mm são de fluxo livre. Evidentemente, existem exceções à regra como, por exemplo, os grãos que fermentam sob diversos teores de umidade e condições atmosféricas adquirem resistência e deixam de ser de fluxo livre (NASCIMENTO, 1996).

Calil Junior (1984) ressalta que a classificação dos produtos armazenados pode ser feita em função das dimensões do diâmetro (D) de suas partículas.

Segundo Ravenet (1983) é necessário efetuar uma classificação das partículas de acordo com o tamanho; o pesquisador classifica as partículas nos seguintes tipos:

- partículas grossas com dimensão superior a 100mm;
- partículas granulares com dimensão compreendida entre 30 e 5mm;
- partículas finas com dimensão compreendida entre 5mm e 100microns;

Dentro deste grupo pode existir coesão.

- partículas extrafinas com dimensão inferior a 10microns.

Calil Júnior (1984) *apud* Barrêto (1997) classifica os produtos armazenados em função das dimensões do diâmetro (D_p) das partículas:

- $D_p > 1\text{mm}$ - granulares;
- $0,297 \leq D_p < 1\text{mm}$ - pulverulentos e/ou pulverulentos coesivos;
- $0,079 \leq D_p < 0,297\text{mm}$ - pulverulentos coesivos finos;
- $D_p < 0,079\text{mm}$ - pulverulentos coesivos extrafinos.

3.4 Propriedades de Fluxo

No Brasil, o conceito de armazenagem se resume a simples ação da permanência do produto na unidade armazenadora levando-se em consideração apenas variáveis como teor de umidade, volume da massa armazenada, temperatura interna, aeração e tempo de armazenagem. Pouca importância é reservada ao fato de que seu conceito se torna mais abrangente no momento em que o produto a ser armazenado, diferentemente dos grãos, possui característica pulverulenta, como no caso de rações animais, cimentos, metais pulverizados, produtos químicos e farmacêuticos, leites, farinhas, floculados etc; neste caso, as ações de carga, armazenagem propriamente dita e descarga, passam a ser governadas pela inter-relação entre as propriedades físicas e de fluxo dos sólidos e entre as características geométricas das unidades armazenadoras. Juliano et al. (2006) citam que as propriedades de fluxo são responsáveis por determinar o comportamento dos produtos armazenáveis em silos, tremonhas e transportadores. Assim, é possível maximizar operações como descargas, transilagem, dosagem e empacotamento (KNOWLTON et al.,1994) e evitar inseguranças no tipo de fluxo e surgimento de obstrutores de saída.

As características dos sólidos têm grande influência nas pressões exercidas nas paredes e no fundo de um silo, tal como no tipo de fluxo que ocorre; entretanto, pouco se conhece sobre as reais propriedades influentes e seus valores.

Dentre os fatores que influenciam o fluxo de produtos sólidos em condição de armazenagem, se destacam a dimensão das partículas, a temperatura, o teor de umidade do produto e o tempo de armazenamento (CALIL JÚNIOR, 1984).

A determinação das propriedades de fluxo é importante por afetar intrinsecamente o comportamento do sólido durante a armazenagem, movimentação e processamento (FITZPATRICK et al., 2004).

3.4.1 Densidade do produto em função da consolidação

Calil Júnior (1984), a densidade do produto não pode ser usada como fator de fluxo. Não há uma relação linear direta entre fluxo e densidade; entretanto, a densidade de um produto precisa ser calculada pois é um parâmetro significativo para determinação do fluxo e das pressões em silo.

Jenike (1964) mostra que a influência da compressibilidade de um produto (mudança de densidade com a pressão de consolidação) no processo de fluxo, é desprezível.

Produtos pulverulentos de baixa densidade têm a vantagem de fluir com menor resistência à compactação na tremonha mas com a desvantagem da inércia em repouso e alta resistência ao ar. Um produto pulverulento de alta densidade pode compactar para uma resistência maior na tremonha mas terá baixa inércia em repouso. O produto granular não é tão compressível e então não ganha muita resistência em sua boca de descarga do silo (CALIL JÚNIOR, 1984).

São definidos, basicamente, três diferentes valores de densidade chamadas, “solta”, “compacta” e “aerada”, para os quais são usados os seguintes símbolos γ , γ_u e γ_a , respectivamente. O valor determinado na célula de cisalhamento corresponde à densidade compacta (γ_u). Quando só um valor (γ) é disponível, então γ_a deverá ser tomado como $0,75\gamma$ e γ_u como $1,25\gamma$. O valor inferior, isto é, γ ou γ_a , deve ser na estimativa da capacidade de armazenamento do silo (CALIL JÚNIOR, 1990).

3.4.2 Ângulo de atrito interno (ϕ) e efetivo ângulo de atrito interno (δ)

O lugar geométrico de deslizamento de produtos granulares de fluxo livre sobre si mesmo para uma condição de consolidação, é a reta obtida pelo cisalhamento de uma amostra do produto sob várias cargas normais. Com as tensões principais σ_1 e σ_2 atuantes em um elemento do produto armazenado para dada condição de consolidação, é construído o respectivo círculo de Mohr (Figura 10). A reta que tangencia todos os círculos é então chamada lugar geométrico de deslizamento do produto (YL). O ângulo de inclinação dessa reta que, para produtos de fluxo livre passa pela origem, é então chamado ângulo de atrito interno do produto (ϕ) (FREITAS, 2001).

No produto, não sendo de fluxo livre, a reta construída da forma indicada anteriormente não passa pela origem, caso em que a ordenada na qual esta reta corta o eixo vertical (eixo das ordenadas) é denominada coesão (C). O ângulo de inclinação desta 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 então

denominada lugar geométrico efetivo de deslizamento (EYL) e o respectivo ângulo de inclinação é denominado ângulo efetivo de atrito interno (δ).

Quando as tangentes às curvas do YL ao círculo de Mohr tendem a ser incertas, o ângulo efetivo de atrito interno é, na prática sempre construído com uma linha entre a origem e o ponto final do lugar efetivo de deslizamento (EYL), como mostra a Figura 10 (NASCIMENTO e CALIL JÚNIOR, 1998).

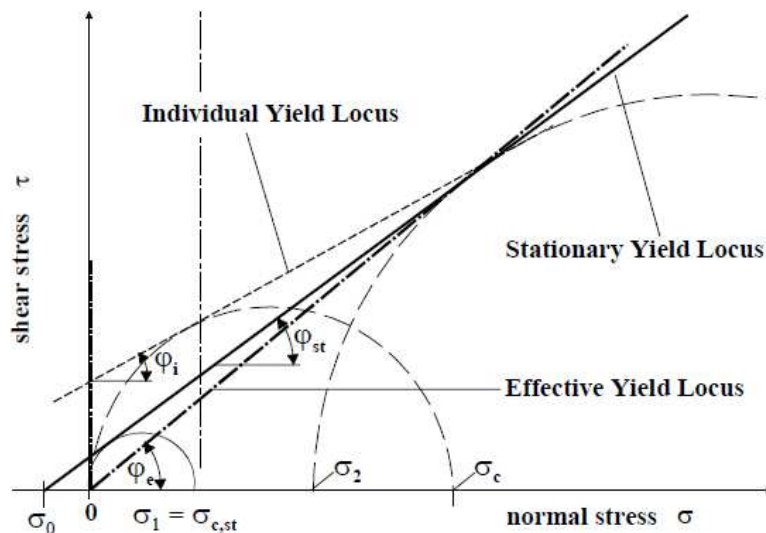


Figura 10 - Lugares geométricos, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito (Fonte: Jürgen Tomas, 2011)

3.4.3 Ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w)

O critério para condições de deslizamento do produto ao longo da parede pode ser expresso como a relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal à parede, chamada lugar geométrico de deslizamento na parede (WYL).

Benink (1989) afirma que 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 (Figura 11).

O lugar geométrico de deslizamento na parede, WYL, para produtos de fluxo livre, pode ser obtido por uma linha direta que passa pela origem, como mostrado pela linha “a” na Figura 11. No caso de produtos coesivos o WYL é uma linha direta com uma ordenada C_w , como ilustrado pela linha “b”. Em alguns casos, a combinação entre

a parede e o produto não segue exatamente este conceito ideal e um WYL um pouco curvado é obtido, como dado pela linha “c”. O ângulo de inclinação da reta que define o lugar geométrico de deslizamento da parede é denominado ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w).

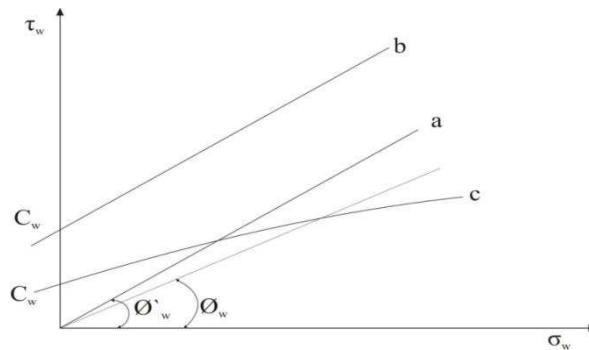


Figura 11 - Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede.
 Fonte: Roberts (1987)

3.4.4 Função Fluxo (FF)

A relação entre a resistência e pressões de consolidação é chamada função fluxo e é denotada por FF (CALIL JÚNIOR, 1989). O grau de consolidação ou sua resistência, é dependente da umidade, tempo de armazenamento e da temperatura do produto.

Calil Júnior(1989) define Função Fluxo (FF) como sendo uma relação entre a resistência e pressões de consolidação atuantes em uma massa armazenada. A função fluxo é uma medida da escoabilidade ou fluidez de um produto passível de ser utilizada para obtenção da abertura mínima de descarga em um silo visando prevenir o arqueamento (BENINK, 1989) devendo ser conhecida nas mais severas condições de aplicação.

A função Fluxo de um produto é um gráfico no qual é plotada a tensão incondfinada de deslizamento do produto versus o maior valor de tensão de consolidação e representa o esforço atuante no produto quando em situação de consolidação (Figura 12).

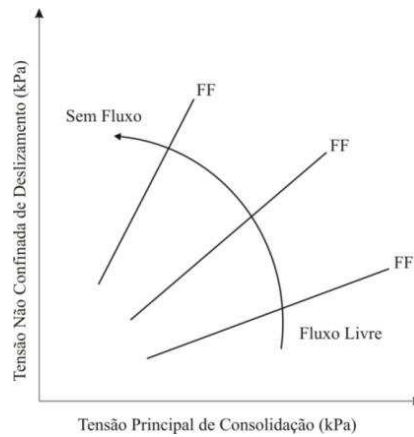


Figura 12. Função Fluxo dos produtos

Schwedes (1996) afirma que o fluxo é melhor descrito pelo uso da função fluxo, como sendo a relação entre a força produzida não confinada e a tensão no estado de fluxo regular.

Garbazza (2011) relata que durante o fluxo o peso específico do produto é uma função das pressões pois, quando as pressões são constantes, o produto cisalha sob densidade constante mas se as pressões aumentam o produto compacta e o peso específico também aumentam porém quando as pressões diminuem, o produto expande; com isto, o peso específico diminui e o fluxo pode prosseguir indefinidamente

Segundo Barreto (1997) a determinação da função fluxo é feita através do gráfico com os pontos de tensão máxima de consolidação versus resistência não confinada de deslizamento, tensões determinadas através dos lugares geométricos de deslizamento.

A função fluxo é uma medida da escoabilidade do produto e pode ser utilizada para obtenção da abertura mínima de descarga em um silo para prevenir o arqueamento (BENINK, 1989).

Jenike (1964) classifica os produtos de acordo com sua função limite de fluxo (FF), como segue:

- FF < 2- muito coesivo e não flui
- 2 < FF < 4- coesivo

$4 < FF < 10$ - fácil fluidez

$FF > 10$ - fluxo livre

As funções de fluxo típicas estão ilustradas na Figura 13 (Walters, 1973; JENIKE et al., 1973).

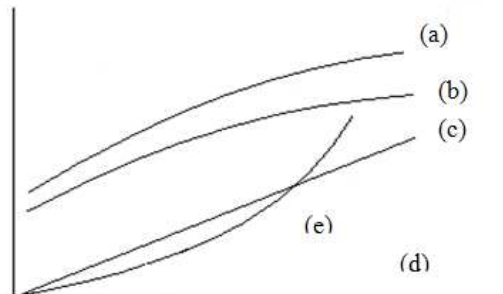


Figura 13- Funções fluxo típicas dos grãos

De acordo com a Figura 13, para a maioria dos casos as funções fluxo para grãos coesivos serão convexas na forma das curvas superiores (a) e (b) ou linhas retas, através da origem, como na curva (c). Grãos representando a última característica são referidos tal qual “grãos simples”. Grãos que fluem livremente não têm coesão e, em consequência, não têm resistência (isto é, $\sigma_c = 0$), sua função fluxo coincide com o eixo horizontal, como no caso da curva (d). A resistência dos mesmos produtos aumenta mais rapidamente quando a tensão de consolidação também aumenta e neste caso a função fluxo representa forma côncava, como na curva superior (e).

3.4.5 Fator Fluxo da Tremonha (ff)

Segundo Palma (2005) o fator fluxo da tremonha ff é outro parâmetro importante para o estudo da fluidez dos produtos armazenados o qual, diferentemente da função fluxo do produto FF, é uma propriedade do conjunto silo-produto, dependendo de algumas características de ambos. Para calcular o fator de fluxo do sistema é necessário conhecer o efetivo ângulo de atrito interno do produto (δ), o ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w), a geometria e a inclinação da tremonha .

Supõe-se, com o cálculo do fator fluxo ff, a solução das equações diferenciais representativas das tensões que surgem nos silos durante a descarga. Tais resoluções foram publicadas por Jenike (1964) para silos de diferentes geometrias na forma de gráficos denominados "gráficos de fatores de fluxo", tal como a função fluxo FF, o fator

fluxo da tremonha ff também é utilizado para indicar a fluidez do produto armazenado porém, ao contrário da função fluxo, quanto mais baixo for seu valor melhor será a fluidez do produto.

Jenike lançou mão de uma teoria para o cálculo do fator fluxo da tremonha denominada Teoria dos Campos de Tensões Radiais a qual determina as tensões durante o esvaziamento perto da saída da tremonha, no entanto é comum a utilização da Teoria de Enstad para seu cálculo, conforme equações abaixo:

$$ff = \frac{Y(1+\sin \delta)}{2(X-1)F(\theta) \cos \theta} \quad (1)$$

$$Y = \frac{(2+2 \cos \alpha)^2(\alpha^{1+m}) \cos \theta + \sin \beta (\sin \alpha)^{1+m}}{(1-\sin \delta)(\sin \alpha)^{2+m}} \quad (2)$$

$$X = \frac{2^m \sin \delta \left[\frac{\sin(\alpha+\beta)+\cos \theta}{\cos \theta} \right]}{1-\sin \delta} \quad (3)$$

$$\alpha = \beta + 90 - \theta \quad (4)$$

$$F(\theta) = \left[\frac{65}{220-\theta} \right]^m \left[\frac{200}{290-\theta} \right]^{1-m} \quad (5)$$

Onde:

$m = 1$ (eixo simétrico) e $m = 0$ (retangular $L \geq 30$)

Outra teoria de grande aceitação para a determinação do fator fluxo (ff) foi proposta por Walker (1966) cujas expressões são:

$$ff = \frac{1+\sin \delta}{\Delta}; \text{ sendo } \alpha + \phi_w \geq 45^\circ \quad (6)$$

$$ff = \frac{1+\sin \delta}{\Delta} \sin 2(\alpha + \phi_w) \text{ sendo } \alpha + \phi_w < 45 \quad (7)$$

Onde:

$$\Delta = 2 \sin \delta \sin 2(\alpha + \varepsilon) - \tan \alpha [1 - \sin \delta \cos 2(\alpha + \varepsilon)] \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left[\phi_w + \arcsen \frac{\sin \phi_w}{\sin \delta} \right] \quad (9)$$

De acordo com Barreto (1997) o fator fluxo é usado para indicar a fluabilidade do produto; quanto maior a tensão máxima de consolidação σ_m em um canal menor a tensão máxima principal σ_1 atuando na obstrução e menor será a fluabilidade do produto.

Existe uma relação muito importante entre a função fluxo e o fator fluxo; a intersecção da reta que define o ff com a FF, definirá a tensão crítica mínima na tremonha (σ_c). Esta tensão garantirá que o orifício de descarga terá um valor mínimo que não permitirá a formação de arco, Figura 14 (b).

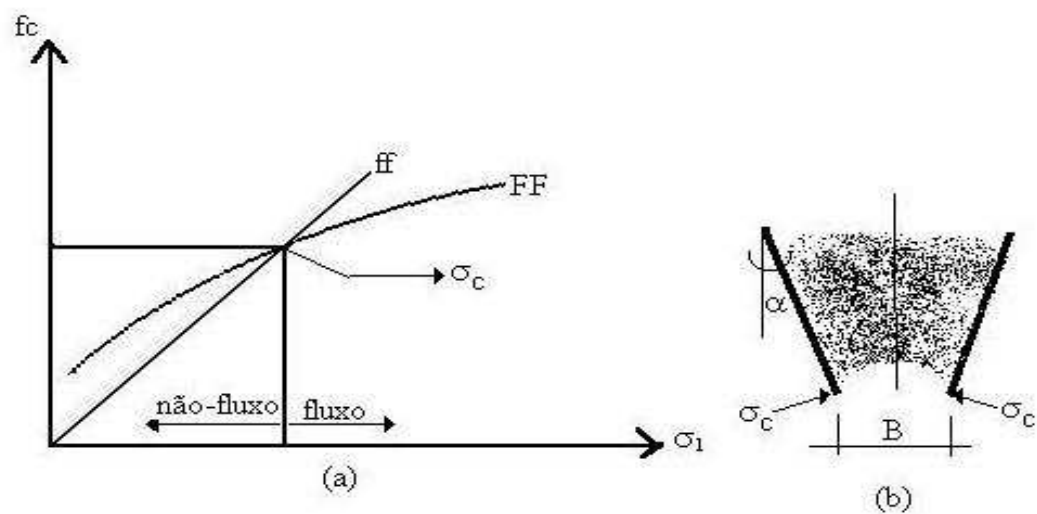


Figura 14 (a) e (b) - Determinação do fator fluxo

De acordo com BMHB (1985) a dimensão mínima do orifício de descarga depende de alguns parâmetros como: densidade consolidada (ρ), aceleração da gravidade(g), tensão crítica (σ_1) e largura mínima da boca de descarga $H(\alpha)$, dadas pela equação 01.

$$B = \frac{H(\alpha)\sigma_c}{\gamma g} \quad (10)$$

3.4.6 - Índice de Fluxo (ff_c)

Jenike (1964) propôs o índice de fluabilidade (ff_c) como parâmetro de predição do comportamento do produto durante o descarregamento do silo obtido pela razão

entre a tensão principal de consolidação, σ_M , e a tensão não confinada de deslizamento, f_C conforme Tabela 4.

Lopes Neto e Nascimento (2013) constataram, ao observar o comportamento da escoabilidade dos produtos armazenáveis, ser esta inversamente proporcional à inclinação da reta que a função fluxo forma com a horizontal. Esta observação foi chamada, pelo autor, índice de fluabilidade (ff_c), o qual 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 Lopes Neto e 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. O autor afirma que a capacidade de fluir (fluidez) de alguns produtos armazenados, geralmente grãos finos (partículas menores que 100 μm), se torna 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 correspondente redução da tensão de cisalhamento (HEZEL, 2007).

3.4.7 Aparelho de Cisalhamento de Jenike

Segundo Roberts e Ooms (1987), em virtude do grande desenvolvimento da mecânica dos sólidos, Jenike inicia, em 1952, seus estudos, investigando a aplicabilidade dos equipamentos de testes disponíveis da mecânica dos solos (aparelho triaxial, aparelhos de cisalhamento diretos, aparelho de cisalhamento anelar) para medir as propriedades dos produtos armazenados visto que todos esses equipamentos foram

insatisfatórios, e ainda desenvolveu um método e um aparelho de cisalhamento direto para produtos armazenáveis, o qual chamou “Jenike ShearCell”, Figura 15.



Figura 15 - Jenike Shear Test



Figura 16 - Sistema de Aquisição de Dados Spider8

O aparelho de cisalhamento de Jenike é equipado com uma célula de cisalhamento de forma circular, colocada sobre a base da máquina; um pendural com pesos, para aplicação de uma carga vertical por gravidade na célula; um suporte de carga acionado eletromecanicamente, o qual promove a ação de cisalhamento movendo-se horizontalmente numa velocidade entre 01 e 03 mm/minuto; uma célula de carga para medir a força de cisalhamento além de um sistema de aquisição de dados Spider8, Figura 16).

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

Quando se planeja o teste de cisalhamento tornar-se necessário seleccionar os níveis de cargas de pré-cisalhamento e de cargas normais de cisalhamento, nos quais os testes serão realizados, referidos como níveis de tensões, normais de pré-cisalhamento e normais de cisalhamento (Figura 17).

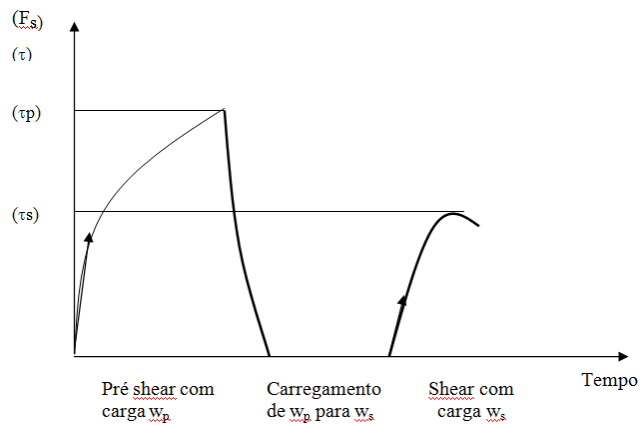


Figura 17 – Curvas de Tensão, Pré cisalhamento e cisalhamento

4 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LaCRA) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande– PB.

4.1 Produtos Utilizados nos Ensaio

Foram determinadas as propriedades físicas e de fluxo de grãos de milho, painço e soja, em três teores de umidade (10,12 e 14%) adquiridos no comércio de Campina Grande – PB.



Figura 18 - Amostra do milho



Figura 19- Amostra do painço



Figura 20 - Amostra do soja

4.2 Propriedades Analisadas

Determinaram-se, na pesquisa, as propriedades físicas, de fluxo e mecânicas de grãos de milho, painço e soja, com teores de água de 10, 12 e 14% (b.u.); comumente, esses teores são utilizados para o armazenamento e comercialização e se utilizaram cargas de compressão de 5, 10, 15 e 20 kN, como referência para o ensaio de determinação de propriedades mecânicas(Módulo de Elasticidade, o Coeficiente de Poisson e Ângulo de Dilatação).

4.2.1. Propriedades Físicas

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

4.2.1.1. Ângulo de Repouso

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

O ângulo de repouso é apenas um parâmetro utilizado para o cálculo da formação do cone da cobertura superior, formado pelo produto.

4.2.1.2. Granulometria

Visando à determinação granulométrica, utilizou-se um conjunto de peneiras padrão ABNT/ASTM, as quais foram montadas em ordem decrescente em função da malha e agitadas em um vibrador elétrico durante 5 minutos; após este processo as peneiras foram retiradas e pesadas em balança eletrônica de precisão de 0,01g; pela diferença de massa em cada peneira foram determinadas as frações granulométricas dos produtos.

4.2.1.3. Teor de umidade

O teor de umidade do produto foi determinado pelo método de estufa com circulação forçada de ar analisando-se três teores de umidades diferentes 10, 12 e 14% b.u. para o milho, painço e soja.

O grau de umidade dos produtos estudados foi determinado antes e durante os ensaios nos quais foram coletadas amostras com o objetivo de avaliar a influência da sua variação, nas propriedades de fluxo dos produtos.

Os testes foram efetuados com três repetições utilizando-se aproximadamente 30 g de produto para cada repetição. As amostras foram colocadas em recipientes de alumínio, pesados em balança digital com precisão de 0,001 g para se obter o peso úmido (Pu) do produto e levados à estufa a temperatura de 105° C, com tolerância de ± 3° C, durante 24 horas; em seguida, foram resfriados em dessecador e novamente pesados obtendo-se o peso seco (Ps). Os teores de umidade foram calculados com uso da seguinte expressão:

$$TU(\%) = \frac{Pu - Ps}{Pu} * 100 \quad (11)$$

Para impedir grandes variações nos teores de umidade dos produtos armazenados passíveis de interferir nos resultados, os ensaios foram conduzidos em área climatizada.

4.3 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 aparente (C) e ângulo de atrito com a parede (ϕ_w); através desses dados foram

encontrados: a tensão máxima de consolidação (σ_M) e a tensão não confinada de deslizamento (f_c), o coeficiente de atrito com a parede (μ) e o fator k de forma indireta.

Adotou-se, para determinação das propriedades de fluxo, a metodologia recomendada pela British Materials Handling Board – BMHB (1985) e, para aquisição dos dados, utilizou-se o aparelho de movimento de translação (TSG 70-140) observado na Figura 21.



Figura 21 - Célula de cisalhamento direto e aparelho (TSG 70-140)

De posse dos resultados e com auxílio de um programa de computação gráfica, foram traçados gráficos de tensão normal versus tensão de cisalhamento (σ, τ), para as cargas utilizadas, o que possibilitou traçar semicírculos de Mohr (Figura 22).

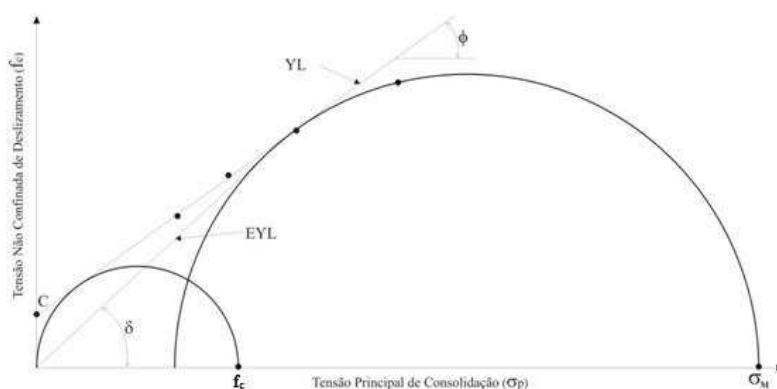


Figura 22 - Lugares geométricos e ângulos de atrito interno (Lopes Neto, 2009)

O ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) foi determinado pelo mesmo equipamento descrito acima, com pequena mudança na base do anel inferior da célula de Jenike pelo tipo de material de parede (alumínio, aço liso e aço rugoso), e também a carga adotada. Os materiais de parede analisados foram escolhidos por serem frequentemente empregados na construção de silos.

Os níveis de cargas normais adotados neste trabalho estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - 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	

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - Propriedades físicas

5.1.1 –Granulometria

Os resultados obtidos dos ensaios granulométricos para o milho, se encontram na Tabela 6. Segundo o critério de classificação de produtos armazenáveis propostos por Calil Júnior (1984) os grãos de milho são considerados produtos granulares visto que granulometria resultou em $D > 1$ mm. Observou-se que os maiores percentuais do produto ficaram retidos na peneira de malha 1,40 mm correspondendo a 86,21% do total; seguindo a mesma metodologia de Calil Júnior (1984), classificou-se o produto como granular.

Tabela 6 - Análise granulométrica de grãos de milho

Produto	Peneira	Retido	Acumulado
	(mm)	(%)	(%)
Milho	1,40	86,21	86,21
	1,00	12,01	98,22
	0,59	1,29	99,51
	0,297	0,63	100,14
	0,149	0,46	100,60

Os resultados obtidos com os ensaios granulométricos para o painço se encontram na Tabela 7. Segundo o critério de classificação de produtos armazenáveis propostos por Calil Júnior (1984) o painço é considerado produto granular, haja vista

que sua granulometria resultou em $D > 1$ mm. Observou-se que os maiores percentuais do produto ficaram retidos na peneira de malha 1,40 mm correspondendo a 98,95% do total e, seguindo a mesma metodologia proposta por Calil Júnior (1984), classificou-se o produto como granular.

Tabela 7 - Análise granulométrica de grãos de Painço

Produto	Peneira	Retido	Acumulado
	(mm)	(%)	(%)
Painço	2,80	0,49	0,49
	2,38	0,70	1,19
	1,40	98,95	100,14

Portanto, para classificação dos produtos estudados utilizou-se a proposta de Calil Júnior (1984) que classifica os produtos em função do diâmetro médio das partículas (d_p); desta forma, os produtos utilizados são considerados produtos granulares sem característica coesiva.

Os resultados obtidos com os ensaios granulométricos para soja se encontram na Tabela 8; segundo critério de classificação de produtos armazenáveis propostos por Calil Júnior (1984), a soja é considerada produto granular haja vista que sua granulometria resultou em $D > 1$ mm. Observou-se que os maiores percentuais do produto ficaram retidos na peneira de malha 4,76 mm correspondendo a 99,91% do total e, seguindo a mesma metodologia proposta por Calil Júnior (1984), o produto foi classificado como granular.

Tabela 8 - Análise granulométrica de grãos da Soja

Produto	Peneira	Retido	Acumulado
	(mm)	(%)	(%)
Soja	4,76	99,91	99,01
	4,00	0,09	100,00

5.1.2 – Ângulo de Repouso(°)

Na Tabela 9 se encontram os valores dos ângulos de repouso dos grãos estudados nos teores de umidade de 10, 12 e 14% expressos em base úmida. Quanto ao ângulo de repouso (θ_r), seu valor médio, após três repetições, se encontra na Tabela 7, o que condiz com os valores normatizados pelas AS 3774 (1996) e BMHB (1985), ambos iguais a 30°; entretanto, esses valores abaixo do descrito pela Eurocode 1 (2006) que é de 37°.

Casaril et al. (2012) obtiveram, nos ensaios com grãos de soja, o ângulo de repouso de 28,1°, o qual interfere no preenchimento do volume de um silo; assim, quanto menor o ângulo de talude maior será o volume de grãos que poderá ser armazenado em um silo confirmando o resultado encontrado nesta pesquisa.

Tabela 9 - Média dos Ângulos de repouso dos grãos

Produto	Ângulo(°)
Milho	26,3
Painço	21,0
Soja	28,0

5.1.3 – Densidade Consolidada (γ)

A densidade consolidada representa a situação à qual os grãos estão submetidos dentro de um silo, ou seja, determinada amostra de grãos localizada na base do silo sofrerá uma carga maior em relação àquela que se encontra localizada na altura intermediária e esta, por sua vez, receberá uma carga maior que aquela do topo; como para o cálculo das pressões atuantes nas paredes e no fundo de silos em que esta propriedade é de grande importância uma vez que sua determinação se faz necessária para dimensionamento estrutural de silos verticais.

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos para a densidade consolidada(γ) da soja cujos valores médios foram os seguintes: 7990,60, 8074,72 e 8153,68 N.m⁻³ para os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.), respectivamente. Constatou-se, em relação ao

menor teor de umidade, um aumento de 1,05 e 1,02% no peso específico (γ), para os teores de umidade de 12 e 14% (b.u.).

Tabela 10 –Teor de umidade, densidade consolidada (γ) e índice de fluxo

Produto	Teor de Umidade (%)	γ (N/m ³)		ff _c
		inf	sup	
Soja	10	6929,96	7105,14	2,28
	12	6977,49	7062,41	4,85
	14	6828,49	7089,64	7,84
Painço	10	7835,20	7947,35	14,01
	12	7881,66	7970,84	7,14
	14	7599,67	7809,02	5,0
Milho	10	7618,90	7760,96	5,75
	12	7699,55	8068,05	3,03
	14	7169,76	7477,91	3,06

γ = densidade consolidada(γ) (N.m⁻³)

Para densidade consolidada (γ) os resultados médios do painço foram de 7891,27; 7926,25 e 7704,34 N.m⁻³ para os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.), respectivamente; já os resultados médios do milho, Tabela 8, para a propriedade da densidade consolidada (γ) foram de 7689,93, 7883,80 e 7323,83 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, aumento na densidade consolidada (γ) nos teores de 12 e 14% (b.u.) respectivamente.

Os resultados de densidade consolidada (γ) para o milho obtidos experimentalmente, se encontram dentro da faixa estabelecida pelas normas AS 3774 (1996) e Eurocode 1 (2006), ou seja, 7500 e 9000 N.m⁻³ valores inferiores e superiores, respectivamente. O milho teve seus valores dentro da faixa das normas AS 3774 (1996)

e Eurocode 1 (2006), em que o limite superior é de 8000 N.m^{-3} mantendo-se, porém, dentro da faixa estabelecida pela norma ACI 313 (1991) de 7400 e 9900 N.m^{-3} , valores inferiores e superiores, respectivamente, enquanto para a soja e o painço os valores se mantêm na faixa estabelecida pela norma AS 3774 (1996) sendo esses 7000 e 8500 N.m^{-3} , valores inferiores e superiores, respectivamente e, pela norma EUROCODE 1 (2006) sendo os valores 7000 e 8000 N.m^{-3} , valores inferiores e superiores, respectivamente.

Recomenda-se, então, 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 possibilidade de uma variação da densidade consolidada (γ) para mais ou para menos.

5.1.4. Índice de Fluxo (ff_c)

A Tabela 8 mostra que o índice de fluxo (ff_c) dos grãos de soja, painço e milho atingiu valores médios de $4,99$, $8,71$ e $3,94$, respectivamente. Apesar dos dados serem apresentados como valores médios e se tomando como base a classificação de Jenike (1964), os grãos de soja e painço apresentam, conforme a classificação, um índice de fluxo fácil enquanto no milho o índice apresentou, segundo a classificação, fluxo coesivo; uma das prováveis causas para contribuição desta classificação foi a maior distribuição granulométrica das partículas.

De acordo com a Tabela 8 pode-se observar, através da classificação da AS 3774 (1996) para a densidade consolidada (γ) dos produtos, que os valores encontrados para os produtos utilizados estão dentro dos limites inferior e superior adotados por esta norma, exceção feita ao produto painço, para o qual Palma (2005) encontrou o valor de $6,2 \text{ kN.m}^{-3}$. Constata-se que, com o aumento do teor de umidade, ocorre aumento do índice de fluxo.

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

Na Tabela 11 estão os resultados das seguintes propriedades de fluxo: coesão (C), ângulo de atrito interno (ϕ) e o efetivo ângulo de atrito (δ) de grãos de soja, obtidos nos ensaios de cisalhamento direto, com os teores de umidade de (10, 12 e 14%).

Tabela 11 Propriedades de fluxo dos grãos

Produto	T.U (%)	Carga(N)	C (Pa)	ϕ (°)	δ (°)
Soja	10	50	2490,70	23	48
		70	3716,80	27	58
		100	1576,00	34	40
	12	50	543,52	31	35
		70	1593,30	39	49
		100	45,16	33	33
	14	50	822,63	36	42
		70	743,25	38	42
		100	443,59	40	42
Painço	10	50	913,39	18	25
		70	213,36	21	22
		100	500,28	19	21
	12	50	855,84	18	25
		70	682,51	20	24
		100	857,25	18	21
	14	50	874,41	19	26
		70	559,42	24	27
		100	2149,00	19	30
Milho	10	50	743,01	29	34
		70	2356,60	23	38
		100	622,10	32	35
	12	50	1138,30	24	35
		70	1691,80	23	32
		100	243,32	28	29
	14	50	1212,90	26	35
		70	1475,60	33	42
		10	2108,20	31	41

Para a coesão (C) dos grãos de soja o maior valor obtido no teor de umidade 10% foi 3716,80 Pa na carga de 70N; já para 12% de umidade o maior valor foi de 1593,30N na carga de 70N e para 14% foi de 822 na carga de 50N .

Para os grãos de painço (Tabela 9) e em função do seu teor de umidade a 10% (b.u.) os mesmos apresentaram os seguintes valores para o ângulo de atrito interno (ϕ) foram de 18 a 21°, o efetivo ângulo de atrito interno (δ) de 21 a 25° e a coesão (C) de 913,39 Pa, respectivamente; para o teor de 12% (b.u.) a coesão foi de 855,84 Pa; ângulo de atrito interno (ϕ) 18 a 20° e para o efetivo ângulo de atrito interno (ϕ) foram de 21 a 35°, respectivamente; já para o teor de 14% (b.u.), a coesão foi de 2049,0 Pa; o ângulo de atrito interno (ϕ) foram de 19 a 24° (ϕ), o efetivo ângulo de atrito interno (δ) foi de 26 a 30°, respectivamente.

Na coesão (C) dos grãos de painço constatou-se, em todos os teores de umidade, decréscimo na carga de 70N; já para a carga 100N ocorreu aumento em todos os teores de umidade; observa-se também que o maior valor de coesão foi de 21149,0, na carga de 100N com teor de umidade de 14% (b.u.), enquanto na carga de 70N se obtiveram os menores valores, em todos os teores de umidades.

A coesão (C) obtida pelos grãos de milho apresentou redução de seus valores no teor de umidade de 10 e 12%; na carga de 100N se obtiveram os valores de: 622,10 e 243,32Pa, enquanto no teor de umidade de 14% se obteve o maior valor para a coesão, que foi de 2108,20 Pa.

Analisando os valores obtidos para os grãos de milho 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 23 e 33°, respectivamente. Observa-se, para o teor de 10% na carga de 70N, que ocorreu um decréscimo no ângulo; o efetivo ângulo de atrito interno (δ), dos grãos do milho, apresentou os seguintes resultados para o intervalo dos limites inferior e superior, de 23 e 32°, respectivamente; observou-se, também, decréscimo do ângulo com o aumento do teor de umidade de 10% e 12% cujo intervalo foi de 23 e 33° e para o efetivos os limites inferior e superior foram 29 e 41°, respectivamente.

Na Tabela 12 se encontram os valores de ângulo de atrito com os vários materiais de parede para o milho, painço e soja, em função do teor de umidade de 10, 12 e 14 % bu, para os seguintes materiais de parede: alumínio, aço liso e aço rugoso.

Tabela 12 - Ângulo de atrito com as paredes

Produto	Parede	Teor de umidade(%)	Ângulo de Atrito com a Parede - ϕ_w (°)		
			inf	médio	sup
Soja	Alumínio	10	7,70	8,37	9,31
		12	9,59	10,29	11,21
		14	9,30	10,04	11,21
	Aço Liso	10	4,86	6,10	6,75
		12	4,87	6,46	7,60
		14	5,04	7,11	8,33
	Aço Rugoso	10	8,90	13,08	15,18
		12	11,03	15,45	17,86
		14	8,02	14,15	18,86
Painço	Alumínio	10	6,93	7,33	8,21
		12	6,45	7,89	9,62
		14	7,69	8,07	8,80
	Aço Liso	10	4,80	5,43	6,01
		12	4,94	5,63	6,12
		14	5,00	6,05	6,62
	Aço Rugoso	10	5,33	6,75	7,78
		12	6,75	8,19	8,85
		14	4,96	6,48	7,25
Milho	Alumínio	10	7,70	8,47	9,79
		12	6,32	7,08	8,59
		14	8,04	9,44	11,63
	Aço Liso	10	4,50	5,17	5,95
		12	4,72	5,38	6,06
		14	5,34	6,65	7,24
	Aço Rugoso	10	7,86	11,98	13,63
		12	13,37	18,20	19,89
		14	14,35	19,02	21,20

Os materiais de parede estudados foram aqueles que, frequentemente, são ou poderão ser utilizados nas construções de silos verticais cilíndricos ou prismáticos, tanto em níveis de fazenda como de indústria, para que se possa oferecer, aos projetistas, dados para os cálculos de pressões atuantes no corpo e na tremonha dos silos, na predição de tipos de fluxo.

Observa-se que, com o aumento do teor de umidade, ocorre aumento do ângulo em todas as paredes e nos grãos de soja o material aço rugoso é o que apresenta os

maiores ângulos. Analisando os resultados dos ângulos de atrito do produto com a parede percebe-se, para o alumínio e o aço rugoso, que o ângulo de atrito aumentou com o aumento do teor de umidade; em virtude da natureza do material de parede utilizado permitindo, assim, que o produto deslize com mais facilidade quando aumentou de volume. Para o aço rugoso o ângulo de atrito do milho, painço e soja, apresentaram tendência de aumento com o incremento do teor de umidade em virtude de ser áspero, quando comparado com os demais, mas contribuiu para que ocorresse maior força de compressão vertical nas paredes dos silos principalmente para materiais mais ásperos observando-se, desta forma, que os ângulos de atrito da parede com do milho, painço e soja, variam de acordo com o material de parede e com o teor de umidade.

A diferença entre o limite inferior e o superior foi, no máximo de 1° ; em termos práticos pode ser considerada desprezível haja vista que se utiliza o coeficiente de atrito do produto com a parede que é igual ao $\arctg\phi_w$. Esses resultados poderão ser utilizados para o dimensionamento de equipamentos de transporte e para o cálculo das ações nas paredes e no fundo dos silos, por constarem dos principais tipos de materiais possíveis para serem empregados na construção de silos e equipamentos. Todas as propriedades de fluxo foram apresentadas com limites superior e inferior, para que os projetistas possam utilizar o método dos estados limites para calcular as pressões atuantes no corpo e na tremonha do silo. Recomenda-se, para melhor esclarecimento do uso dos limites dessas propriedades, a norma australiana AS3774 (1990) e Calil Júnior et al. (1997).

Nascimento et al. (2001), determinaram ensaios com os mesmos materiais de parede e produto e encontraram ângulos próximos aos deste trabalho. A determinação das propriedades de fluxo realizada neste trabalho por Nascimento et al. (2001) foi feita através do equipamento da Jenike Shear Test utilizando-se os mesmos níveis de carga porém a diferença encontrada entre os dois trabalhos foi mínima.

5.2 Conclusões

- Os grãos de soja, painço e milho foram classificados produtos granulares sem características coesivas;
- O índice de fluxo (ff_c) dos grãos de soja, painço e milho foi classificado como de fluxo fácil;
- Com o aumento do teor de umidade para a soja e o painço, ocorreu aumento da densidade consolidada, mas para o milho ocorreu o inverso;
- Para a coesão (C) da soja com o aumento do teor de umidade ocorre redução na carga de 100N nos teores de umidade 12 e 14%; para o painço ocorre redução na carga de 100N nos teores de umidade de 10 e 12% e para o milho com o aumento do teor de umidade houve aumento na coesão na carga de 70N, nos teores de umidade;
- A soja obteve os maiores valores para o ângulo de atrito interno e o efetivo ângulo de atrito interno;
- Com o aumento do teor de umidade observou-se acréscimo no ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) dos grãos de soja, painço e milho; ressalta-se que para nas paredes de alumínio e no aço rugoso foram encontrados os maiores valores;

Capítulo 6

6.1 Fator k

6.1.1 Generalidades

Na determinação da relação entre as pressões horizontais e verticais no produto armazenado, o coeficiente k é um dos maiores problemas no estudo e no projeto de silos; seu valor influencia significativamente no regime de pressões de um silo. Em vários trabalhos de pesquisa e normas são sugeridas diferentes recomendações para o cálculo do valor deste parâmetro. Na maioria dos casos o cálculo de k é realizado conhecendo-se apenas o ângulo de atrito interno do produto, verificando-se casos em que o ângulo de atrito com a parede também é utilizado.

As primeiras pesquisas sobre o parâmetro k para produtos armazenados foram baseadas nas teorias clássicas sobre empuxo de terra, formuladas por Coulomb (1773) e por Rankine (1856) *apud* Calil (1997). Rankine (1984) *apud* Calil (1997) associou o coeficiente k de maciços granulares a três estados de tensão: estado ativo, passivo e em repouso.

De acordo com Ravenet (1983) em 1876 já havia comprovações de que as pressões de descarga eram maiores que as estáticas, com coeficiente de sobrepressão de 2,32; neste mesmo período surgiu o conceito do coeficiente k , que expressava a relação entre a pressão horizontal e a vertical no silo.

Um dos pioneiros na pesquisa das pressões em silos, foi Janssen (1895) que apresentou formulações para o cálculo das pressões horizontais, verticais e de atrito, exercidas pelo produto armazenado; o autor declarou explicitamente, que a relação entre as pressões, k , deveria ser medida para cada produto armazenado.

Segundo Gomes (2000), a mecânica dos solos teve significativa influência na pesquisa sobre silos considerando as peculiaridades das análises feitas na área de processamento dos produtos armazenados. As tensões atuantes numa massa de solo, são bem maiores que as encontradas durante o processamento dos produtos armazenados.

Enquanto a mecânica dos solos trata das tensões antes da ruptura do solo, as teorias para silos se preocupam com as condições sobre as quais a ruptura e o fluxo de um determinado produto armazenado podem ocorrer; desta forma, as similaridades entre os dois campos de estudo permitem algumas aplicações comuns.

Três são os estados de tensão associados a k : estado ativo (k_a), estado passivo (k_p) e estado em repouso (k_o). Os dois primeiros resultam do movimento da parede, respectivamente, para fora e em direção ao produto armazenado enquanto o terceiro acontece quando uma estrutura de retenção inflexível não permite a deformação lateral na periferia do produto.

A Figura 23 apresenta o comportamento da constante k em relação aos deslocamentos relativos da parede.

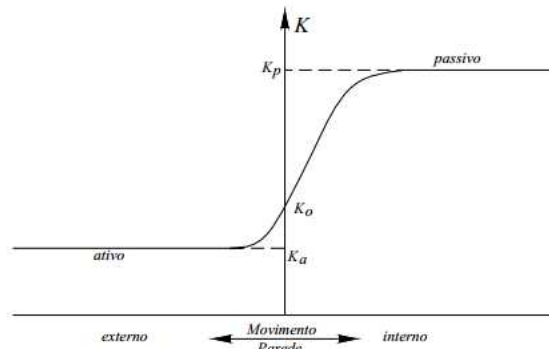


Figura 23 – Comportamento do k em relação aos movimentos relativos da parede (Cheung, 2007).

O valor inferior representa o estado ativo e o valor superior, o estado passivo. Os dois limites são função do ângulo de atrito interno e do ângulo de atrito com a parede.

$$k_a = \frac{1 - \text{sen}\phi_e}{1 + \text{sen}\phi_e} = \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_e}{2} \right) \quad (12)$$

$$k_p = \frac{1 + \text{sen}\phi_e}{1 - \text{sen}\phi_e} = \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_e}{2} \right) \quad (13)$$

As equações (12) e (13), propostas por Coulomb-Rankine para empuxos de terra, podem ser derivadas do círculo de Mohr e são válidas para as situações em que as paredes do silo são lisas e as tensões horizontais e verticais são as tensões principais. A base para as equações de Janssen é que a carga seja transferida do produto armazenado à parede por atrito; então nas paredes do silo as tensões verticais e horizontais não são tensões principais, fazendo com que o uso das equações (12) e (13) para determinar k na equação de Janssen seja teoricamente incompatível, ponto que parece ser frequentemente negligenciado na aplicação destas equações. k_a e k_p podem ser determinados teoricamente, o que não ocorre com os valores intermediários de k quando o produto está no estado elástico.

Kotter (1899) tentou estabelecer a distribuição de tensão mais rigorosamente dentro do produto armazenado e sugeriu que o caso ativo de tensão de Coulomb-Rankine é desenvolvido durante o enchimento do silo enquanto o caso passivo de tensão ocorre na descarga. Durante o fluxo um interruptor ativo-passivo acontece em um plano de transição com condições ativas que prevalecem na porção superior do silo e nas condições passivas nas porções mais baixas.

Nilsson (1986) concluiu, baseado em ensaios em um silo grande (diâmetro $D=6\text{m}$ e altura $H=12\text{m}$) que durante o estágio de enchimento os deslocamentos são grandes o suficiente para promover movimentos relativos de tal magnitude que mobilizam, completar ou quase completamente, em regiões do silo, tanto condições de estado ativo como de estado passivo; já em pequenos modelos de silo ($D=1\text{m}$, $H=3\text{m}$), a fatia vertical e, conseqüentemente, os máximos movimentos laterais ($0,01$ a 1 mm) são tão pequenos que mudanças no K e nas pressões laterais são difíceis de detectar; portanto, os resultados das medidas de pressão em silos modelos podem não ser válidos para grandes silos e medidas com um produto podem não ser válidas para outro com propriedades diferentes de compressibilidade.

A relação entre a pressão horizontal e a vertical em qualquer ponto de uma massa granular, é definida como a relação k , também conhecida como coeficiente de pressão lateral; este é um importante parâmetro requerido no cálculo das pressões exercidas por produtos armazenados nas paredes e fundo do silo pois define a porcentagem da distribuição das pressões em função da relação H/D .

Várias são as recomendações para determinação, direta e indireta, do valor de k realizadas por pesquisadores enquanto as normas especializadas propõem valores empíricos e teóricos para este parâmetro e ainda recomendam a utilização de equipamentos especiais para sua medição.

Assumindo quase sempre, como sendo parte da equação de Janssen, o parâmetro k foi de fato introduzido por Koenen em 1986, determinado com base no coeficiente de pressão (k_a) da teoria de Rankine para empuxo de terra (CALIL JÚNIOR, 1997)

Existem tabelas para estimativas de k , e formulações para obtenção, nas condições de carregamento e descarregamento; Contudo, Freitas (2001), destaca haver grandes variações nos valores de k se comparados aos encontrados através de equações desenvolvidas por diferentes pesquisadores e aos adotados por normas internacionais.

Em vários trabalhos de pesquisa e norma são sugeridas diferentes recomendações para calcular a relação de pressão (DINIZ e NASCIMENTO, 2006).Na

maioria das diferentes recomendações existentes, pode notar, ainda, muita incerteza na determinação da relação de pressão. Experiências sinalizam que os valores passíveis de serem agrupados em seis grupos primários (KAMINSKI e WIRSKI, 1998):

- As propriedades físico-químicas do produto granular;
- A forma e dimensões do silo;
- O tipo de fluxo do produto durante o descarregamento do silo;
- As características das operações tecnológicas;
- O efeito de tempo e os parâmetros térmicos e de umidade;
- A interação entre a estrutura de silo e o produto granular.

Segundo Haaker (1990) apud Silva et al. (2003), o problema referente a toda as propostas para o parâmetro k , é o fator de que elas foram obtidos somente das hipóteses de que o material está em um estado de deslizamento e o atrito com a parede é mobilizado por completo. Essas hipóteses, segundo ele, não são necessariamente cumpridas na parede vertical da célula.

6.2 Objetivo Geral

- ✓ Comparar o fator k (razão entre a pressão horizontal/ pressão vertical) encontrado através da célula de determinação das propriedades mecânicas com o fator k recomendado através de diferentes teorias;

6.3 Recomendações para o cálculo do k

Em diversos trabalhos de pesquisa e normas internacionais são sugeridas diferentes recomendações para calcular a relação entre as pressões. Na maioria dessas recomendações o parâmetro k é determinado apenas com o conhecimento do efetivo ângulo de atrito interno, (δ); em algumas relações o ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) também é levado em consideração.

Kaminski e Wirska (1998) afirmam que os valores das pressões e do parâmetro k relacionados dependem de quase quarenta fatores que se podem agrupar em seis grupos primários: as propriedades físico-químicas do produto granular; a forma e as dimensões

do silo; o tipo de fluxo do produto durante o descarregamento do silo; o efeito de tempo e parâmetros térmicos e de umidade; e a interação entre a estrutura do silo e o produto granular utilizado.

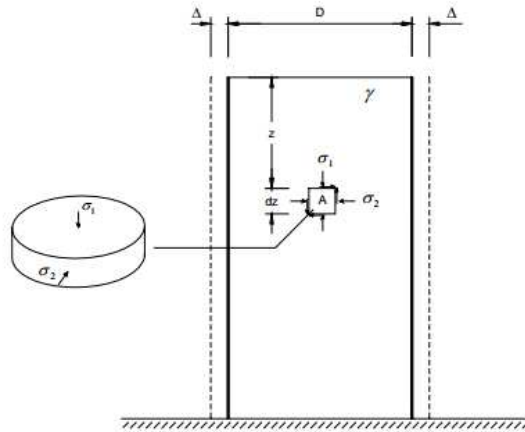


Figura 24: Estado de tensões em uma fatia elementar do produto armazenado (ESTEVES, 1989)

De acordo com o estado de tensões apresentado na Figura 24 e pela teoria da elasticidade, pode-se determinar as deformações pelas equações (14) caso se considere o produto armazenado como sendo material homogêneo e isotrópico.

$$\varepsilon_v = \frac{1}{E_p} \cdot (pv - 2 \cdot ph \cdot vp) \quad e \quad \varepsilon_h = (ph - vp \cdot (ph + vp)) \quad (14)$$

lembrando que:

$$\sigma_1 = P_v; \quad \sigma_2 = P_h; \quad k = \frac{Ph}{pv} \quad e \quad \varepsilon = \frac{1}{E_p} (k \cdot P_v - v_p \cdot (P_v + k \cdot P_v))$$

donde:

v_p = Coeficiente de Poisson dos produtos;

E_p = Módulo de Elasticidade dos grãos

Isolando o k, tem-se:

$$ka - \text{tag}2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi e}{2} \right) \leq k_0 = \frac{\left(\frac{e h \cdot E_p \rho_0}{p} \right)}{(1 - v_p)} \leq k_p = \text{tag}2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi e}{2} \right) \quad (15)$$

No caso de silos metálicos cilíndricos e se desprezando o efeito de placa, o valor de ε_h pode ser estimado pela fórmula:

$$\varepsilon_h = \frac{\sigma_e}{E_s} \quad (16)$$

sendo:

σ_s = tensão horizontal nas paredes do silo

E_s = Modulo de elasticidade das paredes do silo

Quando as paredes forem rígidas, $\varepsilon_h = 0$, obterão o coeficiente de empuxo neutro ou em repouso: $k_0 = \frac{\nu_p}{(1-\nu_p)}$ (17)

Considerando ε_h constante ao longo da altura do silo e p_v variável verifica-se, pela equação (17), que k não é constante.

A opinião é que k pode ser assumido, Jenike e Johanson (1973) indicam que $k = 0,40$ é adequado para a maioria das aplicações para produtos granulares e Holmes (1972) aponta $k = 0,45$ como satisfatório.

Um dos pioneiros na pesquisa das pressões em silos, foi Janssen (1985) que apresentou formulações para o cálculo das pressões horizontais, verticais e de atrito exercidas pelo produto armazenado; ele declarou explicitamente, que na relação entre as pressões k deveria ser medida para cada produto armazenado.

Três são os estados de tensão associados a k : estado ativo (k_a), estado passivo (k_p) e estado em repouso (k_0), em que os dois primeiros resultam do movimento da parede, respectivamente, para fora e em direção ao produto armazenado, enquanto o terceiro ocorre quando uma estrutura de retenção inflexível não permite a deformação lateral na periferia do produto.

O valor inferior representa o estado ativo e o valor superior representa o estado passivo; os dois limites são produto do ângulo de atrito interno e do ângulo de atrito com a parede.

As equações (18) e (19), propostas por Rankine para empuxos de terra, podem ser derivadas do círculo de Mohr e são válidas para as situações em que as paredes do silo são lisas e as tensões horizontais e verticais são as tensões principais.

$$k_a = \frac{1 - \text{sen } \phi_w}{1 + \text{sen } \phi_w} = \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_w}{2} \right) \quad (18)$$

$$k_p = \frac{1 + \text{sen } \phi_w}{1 - \text{sen } \phi_w} = \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_w}{2} \right) \quad (19)$$

A base para as equações de Janssen é que a carga seja transferida do produto armazenado à parede por atrito; então nas paredes do silo, as tensões verticais e horizontais não são tensões principais. Isto faz com que o uso das equações (18) e (19) para determinar k na equação de Janssen seja teoricamente incompatível.

Este ponto parece ser frequentemente negligenciado na aplicação destas equações. Rotter (1899) tentou estabelecer a distribuição de tensão mais rigorosamente dentro do produto armazenado e sugeriu que o caso ativo de tensão de Rankine é desenvolvido durante o enchimento do silo, enquanto o caso passivo de tensão ocorre na descarga. Durante o fluxo, um interruptor ativo-passivo acontece em um plano de transição com condições ativas que prevalecem na porção superior do silo e condições passivas nas porções mais baixas.

6.4 Recomendação dos pesquisadores

Uma das expressões mais aceitas para determinação do valor de k , foi proposta por Koenen(1896) para utilização na formulação de Jansen, equação (20), determinada com base no coeficiente de empuxo ativo da teoria de Coulomb-Rankine para empuxos de terra; e expressão é válida para ângulos de atrito com a parede igual a zero.

Jaky (1948) apud Lohnes (1993) obteve a seguinte relação para o parâmetro k para o caso do produto em repouso e parede lisa e rígida:

$$k = \left(1 + \left(\text{sen } \phi_w \right) \left(\frac{\left(1 + \frac{2}{3} \text{sen } \phi_w \right)}{\left(1 + \text{sen } \phi_w \right)} \right) \right) \quad (20)$$

$$k = \frac{\left(1 + \text{sen } \phi_w \right) \left(1 + \frac{2}{3} \text{sen } \phi_w \right)}{\left(1 + \text{sen } \phi_w \right)} \quad (21)$$

A equação (21) foi simplificada para a formulação mais utilizada:

$$k = 1 - \text{sen } \phi_e \quad (22)$$

Walker (1966) apud Lohnes(1993), ou assumindo que o produto ensilado está em ruptura e, simultaneamente, deslizando ao longo de uma parede rugosa, a geometria do círculo de Mohr para incluir o coeficiente de atrito com a parede, ϕ_w , na equação de relação de pressão, obtendo:

$$k = \frac{1 + \operatorname{sen}^2 \phi_w - 2\sqrt{(\operatorname{sen}^2 \phi_w - \mu^2 \cos^2 \phi_w)}}{4\mu^2 + \cos^2 \phi_w} \quad (23)$$

De acordo com Hartlen (1984) apud Lohnes (1993), Hartmann, baseado na teoria da elasticidade sugere, em 1966, a expressão (23) para calcular a relação entre as pressões em silos de paredes rugosas.

$$k = \frac{1 - \operatorname{sen}^2 \phi_w}{1 + \operatorname{sen}^2 \phi_w} \quad (24)$$

A equação (25) é independente do coeficiente de atrito com a parede. Rotter (1988) apud Lohnes (1993) considera esta equação válida para paredes que sejam tão rugosas que os grãos do produto armazenado deslizem uns sobre os outros, ao invés de deslizar sobre a parede da célula, como é o caso dos silos metálicos de paredes de chapa de aço corrugado.

Frazer, apud por Calil (1984) encontrou, considerando, o equilíbrio das forças no contorno da superfície da parede para o estado de ruptura incipiente, a seguinte expressão para o cálculo do k:

$$k = \frac{1}{\frac{1 + \operatorname{sen}^2 \phi_e + \frac{2\operatorname{sen} \phi_w}{\cos^2 \phi_w} \cdot \sqrt{1 - \frac{tg^2 \phi_w}{tg^2 \phi_w}}}{\cos^2 \phi_w}} \quad (25)$$

Aoki, apud por Benink (1989), propõe baseando-se na hipótese de Walters a seguinte expressão para o parâmetro k:

$$k = \left[1 + 2 \tan^2(\phi_e) + \frac{4\sqrt{1 + \tan^2(\phi_e)}}{3\mu_w^2} \cdot \left\{ \tan^3(\phi_e) - (\tan^2(\phi_e) - \mu_w^2)^{\frac{3}{2}} \right\} \right]^{-1} \quad (26)$$

Conclui-se utilizando a equação (26) na formulação de Jansen (1985) que os valores de pressão obtidos são iguais aos propostos por Walter (1973).

Bischara et al (1983) aprovam através de uma fórmula não linear do método dos elementos finitos, que a relação entre pressões, k, é um parâmetro constante para determinado tipo de silo e dado produto e propõem diferentes fórmulas para o

parâmetro k em função da granulometria do produto, como a seguir: Para produtos cujo diâmetro máximo é menor ou igual a 2,5 mm:

- Para produtos cujo diâmetro máximo é menor ou igual a 2,5 mm:

$$k = 0,16 \frac{\cot^2 \phi_i \gamma^{0,15}}{\mu^{0,08} d^{0,17}} \quad (27)$$

- Para produtos cujo diâmetro máximo é maior que 2,5 mm

$$k = 0,16 \frac{\cot^2 \phi_i}{\sqrt{\text{sen} \phi_i \gamma^{0,04} \mu^{0,05} d^{0,11}}} \quad (28)$$

Benink (1989) sugere dois valores limites para k:

- Para k no centro do silo, utilizar a equação (14) de Rankine-Koenen

- Para k na parede do silo, utilizar a equação (29).

$$k_{\text{parede}} = \frac{1 + \text{sen} \phi_e \cdot \cos(2\beta_a)}{1 - \text{sen} \phi_e \cdot \cos(2\beta_a)} \quad (29)$$

em que:

β_a para o estado ativo é dado pela expressão (30):

$$\beta_a + \left[\frac{\pi}{2} + \phi_w + \arccos \left(\frac{\text{sen} \phi_w}{\text{sen} \phi_e} \right) \right] \quad (30)$$

Segundo Calil (1990), verificada a relação entre as pressões verticais e horizontais em ensaios de modelos adotando-se o valor de k determinado experimentalmente para cada silo a ser projetado, a expressão para o cálculo das pressões horizontais em silos baixos é dada por: $p_h = \gamma \cdot h \cdot k$, expressão também citada por Rankine. Então, o modelo empírico então se baseia na determinação do valor de k, de forma indireta ou experimentalmente.

Ayuga (1995) determina o valor de k em função do tipo de parede e adota três equações:

- Para o caso de paredes absolutamente lisas, $\phi_w = 0$, adota a equação (14) de Rankine-Koenen;

- Para o caso de paredes muito rugosas, $\varphi_i = \varphi_w$, adota a equação (26) de Hartmann;

- Para os casos intermediários, adota a formulação do k proposta pela norma francesa SNBATI (1975), apresentada na equação (32).

$$k = \frac{1 - m \cdot \text{sen} \varphi_e}{1 + m \cdot \text{sen} \varphi_e} \cdot \cos^2 \varphi_w \quad (31)$$

em que:

$$m = \sqrt{1 - \frac{\text{tg}^2 \varphi_w}{\text{tg}^2 \varphi_e}} \quad (32)$$

Haaker (1999) relata que o problema com as propostas para o parâmetro k é residuo no fato de que todas elas foram obtidas somente das hipóteses de que o produto está em um estado de deslizamento e o atrito com a parede é mobilizado completamente. Essas hipóteses, segundo ele, não são necessariamente cumpridas na parede vertical da célula.

Stoffers, apud Kaminsk e Wirska (1998), vêem que a causa da variabilidade na determinação dos valores do parâmetro k, no caráter estocástico das pressões, e na falta de bons equipamentos de medição, aponta dificuldades no desenvolvimento de um modelo numérico que incorpore o caráter estocástico do fenômeno das pressões.

Segundo Lohnes (1993), não existe, claramente, qualquer acordo completo sobre o que constitui um valor apropriado para o parâmetro k e poucos dados experimentais estão disponíveis para comparação com cálculos teóricos. Ainda Lohnes (1993), a hipótese do produto armazenado estar em ruptura parece irracional para cargas estáticas e sugere, para produtos que estão confinados mas não em ruptura, a equação simplificada de Jaky (22).

6.5 Recomendação das normas internacionais para o cálculo do k

As normas estrangeiras propõem, em tabelas próprias, valores para o parâmetro K para alguns produtos listados ou indicam fórmulas matemáticas para sua obtenção fornecendo os valores dos parâmetros envolvidos ou para o caso dos mesmos serem obtidos experimentalmente.

A norma francesa, SNBATI (1975), define dois valores para k em função dos estados de carregamento e descarregamento central.

- Para o carregamento do silo adota a equação (30) apresentada anteriormente;
- Para o descarregamento do silo, adota a seguinte expressão:

$$k = \cos^2 \phi_w \quad (33)$$

A norma canadense, CFBC (1983), somente fornece o valor de k em uma tabela para oito produtos em função da rugosidade da parede; para produtos granulares apresenta o valor de 0,4 para paredes lisas e 0,6 para paredes rugosas.

A norma britânica, BMHB (1985), define dois valores para k:

- Para o cálculo das pressões verticais, adota $k = 0,25$;
- Para o cálculo das pressões horizontais, adota $k = 0,60$,
- Exceto em casos em que a parede seja muito rugosa, o valor de k deve ser tomado igual a 0,75.

A norma americana, ACI 313-91 (1991) propõe, para o valor de k, a fórmula de Rankine – Koenen (3), substituindo o efetivo ângulo de atrito interno (δ) pelo ângulo de repouso (ϕ_w) que, de modo geral, é menor que (ϕ).

A norma australiana, AS3774 (1996), adota a fórmula de Walker para determinação do valor de k, equação (6), limitando k como maior ou igual a 0,35. Esta norma fornece, em tabela própria, os valores limites inferior e superior de (ϕ) para 23 produtos e o respectivo (ϕ_w), em função da rugosidade da parede e propõe, em anexo, a obtenção de (δ), para o caso de silos de parede de chapa de aço corrugada. Com base nos valores de (ϕ) e (ϕ_w), esta norma propõe a determinação do k através de ábaco próprio, para cada ângulo de atrito com a parede do silo.

A norma europeia, ISO 11697 (1997), fornece o valor de k em uma tabela para cinco classes de produtos, apenas para paredes lisas. Os valores fornecidos na tabela variam de 0,30 a 0,75. Para os produtos que não constam nesta tabela o valor de k pode ser determinado experimentalmente, semelhante ao proposto pela norma PrENV 1991-4 (2002), ou de forma indireta, pela expressão de Jaky, considerando um coeficiente de ponderação igual a 1,1, ou seja:

$$k = 1,1 (1 - \text{sen}\phi) \quad (34)$$

A norma americana, ANSI/ASAE EP 433 (2001), adota um único valor do parâmetro k de 0,50 para produtos granulares agrícolas.

A norma europeia, PrENV 1991-4 (2002), fornece o valor de k em uma tabela para dez produtos, para paredes lisas e rugosas, excluindo a de chapa corrugada; os valores fornecidos na tabela variam de 0,40 a 0,55.

Para os produtos que não constam nesta tabela o valor de k pode ser determinado experimentalmente por metodologia definida em anexo da norma, obtenção direta com a determinação da pressão horizontal e vertical ou de forma indireta, como apresentado na Equação (35).

A norma alemã, DIN 1055-6 (2005), fornece o valor de k para uma gama de produtos variando entre 0,4 e 0,65. Para os produtos não listados propõe a forma indireta de determinação pela expressão de Jaky, considerando um coeficiente de ponderação igual a 1,2 (equação 35), em que (φ_w) deverá ser obtido em ensaio de cisalhamento direto.

$$k = 1,2(1 - \text{sen}\varphi_w) \quad (35)$$

De acordo com a norma DIN 1055-6 (2005), o fator k foi escolhido para garantir que em pequenas alturas do produto armazenado, ou seja, na parte superior do silo, resultem curvas de pressão mais completas.

Analisando os dados apresentados na Tabela 13, pode-se constatar que o valor limite de k adotado pela norma australiana (AS 3374) é sempre menor que os adotados pelas normas européias (ISO 11697 e PrENV 1991-4) e pela norma alemã (DIN 1055-6), com diferenças de 50%, como no caso da cevada para o limite inferior, até 97% para o limite superior do açúcar.

O limite inferior constante ($K_I=0,25$) adotado pela norma inglesa, BHMB (1985), para todos os produtos, é muito baixo em comparação aos propostos pelas outras normas atingindo a diferença de até 116%.

Tabela13: Valores limites de k para alguns produtos, de acordo com as principais normas

Norma	Aas 3374 (196)		Iso 11697 (1997)		PrENV 1991-4 (2002)		DIN 1055-6 (2005)	
	Kl	Ku	Kl	Ku	Kl	Ku	Kl	Ku
Cevada	0,36	0,44	0,54	0,69	0,53	0,65	0,53	0,65
Cimento	0,35	0,35	0,54	0,69	0,44	0,64	0,44	0,64
Clínquer	0,35	0,35	0,45	0,58	0,27	0,49	0,27	0,49
Areia	0,35	0,38	0,45	0,58	0,40	0,50	0,40	0,50
Farinha	0,46	-	0,36	0,46	0,32	0,40	0,32	0,40
Milho	0,39	0,41	0,54	0,69	0,46	0,60	0,46	0,60
Açúcar	0,35	0,35	0,54	0,69	0,41	0,59	0,41	0,59
Trigo	0,43	0,44	0,54	0,69	0,40	0,59	0,49	0,59
Carvão	0,35	0,35	0,45	0,58	0,45	0,59	0,45	0,59

Fonte: Nascimento, 2008

Calil(1984) determinou o valor do coeficiente k a partir dos dados experimentais de pressões obtidas em silos modelos com paredes lisas, carregados com milho, ração e farinha de trigo. Os resultados experimentais foram comparados com os valores teóricos definidos por Rankine, Walker, Frazer e Jaky. Aquele concluiu que os resultados de k obtidos pela fórmula de Frazer foram os que melhor se aproximaram dos resultados experimentais para todos os produtos analisados; conclui-se, além disto, que o valor de k varia com a relação altura-lado do silo e que durante a descarga há acréscimo significativo do valor de k para produtos granulares e permanecendo praticamente constante para produtos coesivos

A maioria das normas internacionais adota a equação 34 para determinação indireta do coeficiente k; portanto, apesar da rugosidade da flexibilidade da parede influenciar no valor de k, ele é considerado constante; tal simplificação é satisfatória desde que sejam consideradas paredes suficientemente rígidas e lisas.

6.6 - Material e Métodos

O trabalho foi realizado no Laboratório de Resíduos e Construções Rurais e Ambiente (LaCRA), do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande – PB, da Universidade Federal de Campina Grande.

A relação entre a pressão horizontal e a vertical em qualquer ponto de uma massa granular é definida como a relação k , também conhecida como coeficiente de pressão lateral; este é um importante parâmetro requerido no cálculo das pressões exercidas por produtos armazenados nas paredes e fundo do silo pois define a porcentagem da distribuição das pressões em função da relação H/D .

Várias recomendações de determinação direta e indireta do valor de k são realizadas por pesquisadores enquanto as normas especializadas propõem valores empíricos e teóricos para este parâmetro e ainda recomendam a utilização de equipamentos especiais para sua medição.

Com base nas propriedades de fluxo dos grãos de milho, painço e soja, determinadas no aparelho de Jenike Shear Test, o fator k foi calculado de forma indireta, através das fórmulas propostas pelos autores Aoki (1978), Frazer (1993), Hartmann (1966), e Jaky (1948) e pelas equações das normas internacionais ACI 313 (1991), AS 3774 (1996), DIN 1055 (2005) e EUROCODE 1 (2006).

A maioria das equações propostas leva em conta que elas se encontram na Tabela 14.

Tabela 14. Equações propostas por pesquisadores para o coeficiente k .

Autor e Normas internacionais	Equação proposta
--------------------------------------	-------------------------

Aoki	$k = \left[1 + 2 \operatorname{tg}^2 \delta + \frac{4\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}{3\mu^2} \left\{ \operatorname{tg}^3 \delta - (\operatorname{tg}^2 \delta - \mu^2)^{\frac{3}{2}} \right\} \right]^{-1}$
Frazer	$k = \frac{1}{\frac{1 + \sin^2 \delta}{\cos^2 \delta} + \frac{2 \sin \delta}{\cos^2 \delta} \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \phi_w}{\operatorname{tg}^2 \delta}}}$
Hartmann	$k = \frac{1 - \sin^2 \delta}{1 + \sin^2 \delta}$
Jaky	$k = \frac{(1 - \sin \delta) \left(1 + \frac{2}{3} \sin \delta \right)}{1 + \sin \delta}$
ACI 313 (1991)	$k = \frac{1 - \sin \delta}{1 + \sin \delta}$
AS 3774 (1996)	$k = \frac{1 + (\sin^2 \delta) - 2\sqrt{\sin^2 \delta - \mu^2 \cos^2 \delta}}{4\mu^2 + \cos^2 \delta} \leq 0,35$
DIN 1055 (1987)	$k = 1,2(1 - \sin \delta)$
EUROCODE 1 (2006)	$k = 1,1(1 - \sin \delta)$

6.7 Resultados e Discussões

Nesta pesquisa uma das propostas foi determinar o fator k experimental para o milho nos três teores de umidade (10, 12 e 14%). Esses dados foram obtidos através das pressões horizontais e verticais dos grãos estudados e obtidos da célula de compressão uniaxial quando então foi possível calcular k experimental ($k_{exp.}$), e depois comparar com os valores empíricos das equações dos autores e das normas internacionais.

Na Tabela 15 se encontram os valores médios obtidos para o k experimental para o milho nos três teores de umidade testado (10, 12 e 14%); esses dados foram obtidos através das pressões horizontais e verticais dos materiais estudados; e da célula de compressão uniaxial no equipamento de determinação das propriedades mecânicas foi possível calcular k experimental ($k_{exp.}$), utilizando-se como referência máquina universal de ensaios do modelo Autograh – AG-IS 100 KN e expresso por planilhas do Excel; observou-se que com o aumento da umidade ocorreu aumento no fator k experimental.

Comparando os valores obtidos experimentalmente, como as formulações dos pesquisadores observam-se diferenças para os autores e para as normas utilizadas internacionalmente.

Tabela 15 – Valores de k experimentalmente para o milho

Fator k Experimental	Carga 5 kN	Carga 10kN	Carga 15kN	Carga 20kN	Média
Milho 10%	0,08	0,07	0,05	0,04	0,06
Milho 12%	0,08	0,07	0,06	0,05	0,07
Milho 14%	0,08	0,08	0,07	0,06	0,07

Analisando os resultados apresentados na Figura 25 para os grãos de milho, observa-se que os valores obtidos na equação de Hartmann (1966) foram mais representativos que os valores encontrados pela equação de Jaky (1948); esta variação se apresentou em todos os teores de umidade (10, 12 e 14%).

Portanto, o valor de k experimental para os grãos de milho nos teores de umidade de 10,12 e 14%, e para a equação de Hartmann (1966), os valores encontrados foram de 87,76, 87,5 e 83,72%, respectivamente, demonstrando que as equações são menos susceptíveis à variabilidade de efetivo ângulo de atrito interno; analisando os

dados, os pesquisadores assumem que o produto ensilado está em ruptura, e deslizando ao longo da parede rugosa, usou-se a geometria do círculo de Mohr para incluir o coeficiente de atrito com a parede. Nascimento (2008) encontrou, estudando o milho, valores aproximados através das formulações sugeridas pelos pesquisadores que apresentaram diferenças significativas para o valor de k para o milho.

O maior valor obtido pelas equações foi o encontrado pela Hartmann (1966) e o menor foi para Frazer (1993).

Analisando a diferença encontrada entre os valores obtidos pela equação de Hartmann (1966) e para os valores experimentais, a diferença foi de 87,76, 87,5 e 84,09 dos respectivos teores de umidade 10,12 e 14%.

Os valores de Aoki(1978) e Frazer (1948) apresentaram pequenas variações entre os resultados dos teores de umidade de 10 e 12%; para o teor de 14% praticamente tiveram o mesmo resultados.

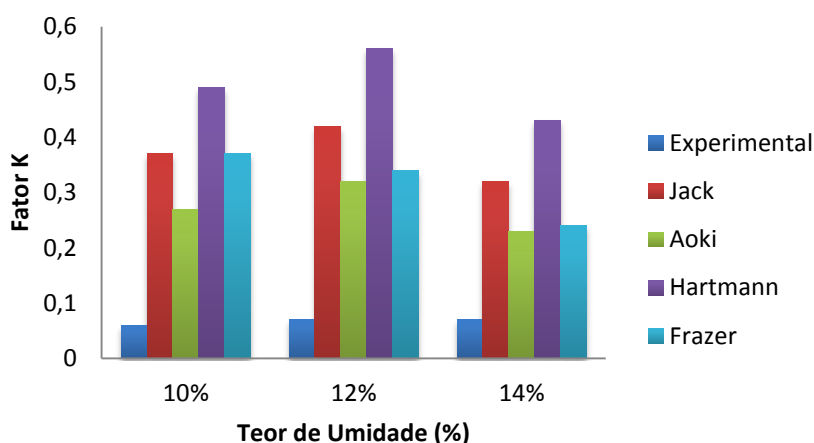


Figura 25 – Valores do Fator k para grãos de milho

Com base na Figura 26 os resultados obtidos pelas equações das normas internacionais para os grãos de milho, observa-se que no teor de umidade de 10 e 12% ocorreu aumento dos valores enquanto no teor de umidade de 14% ocorreu decréscimo nos valores e a norma DIN 1055(2005) e a EUROCODE 1(2006) foram as que apresentaram os maiores valores enquanto as normas ACI 313 (1991) e AS 3774 (1996) se mantiveram praticamente constantes.

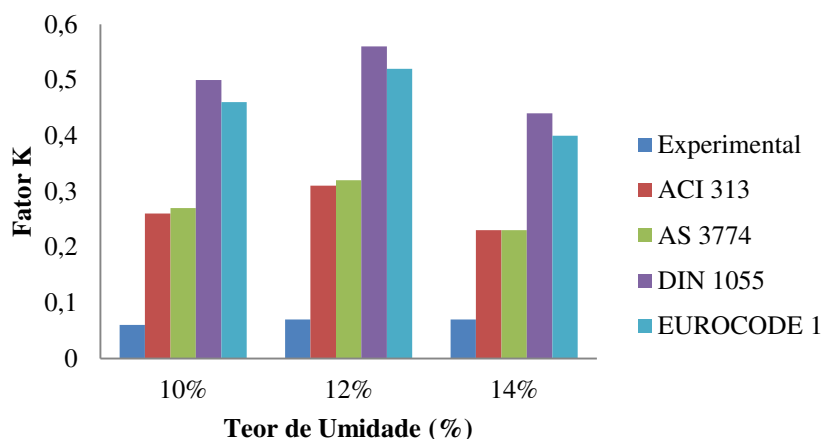


Figura 26 – Valores do Fator k para os grãos de milho

Observou-se variação nos valores das normas internacionais com o aumento do teor de umidade, sendo que os maiores valores observados foi no teor de 12% e os menores, em 14%; por outro lado, os valores experimentais se mantiveram praticamente constantes, ocorrendo apenas um acréscimo do valor de 0,01(8,3%) em relação ao teor de umidade de 12%.

Dos resultados experimentais os calculados pelas equações das normas ACI 313(1991) e AS 3774 (1996) sofreram variação no seu fator k de 0,01 em todos os teores de umidade

Comparando os valores obtidos pela DIN 1055(2005) com os resultados obtidos experimentalmente, observa-se que o calculado apresenta valores 88,0, 87,5 e 83,73%, para os respectivos teores de umidade 10,12 e 14%, e as normas ACI 313(1991) apresentaram os menores valores, que foram de 76,93, 77,42 e 70,84%, superiores para os respectivos teores de umidade de 10,12 e 14%. para o painço pela equação de Hartmann (1966), a mesma apresentaram os maiores valores para todos os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.), sinalizando, assim, ser uma equação conservacionista em referência às outras estudadas; observou-se que no teor de umidade de 10% os valores experimental se mantiveram praticamente iguais.

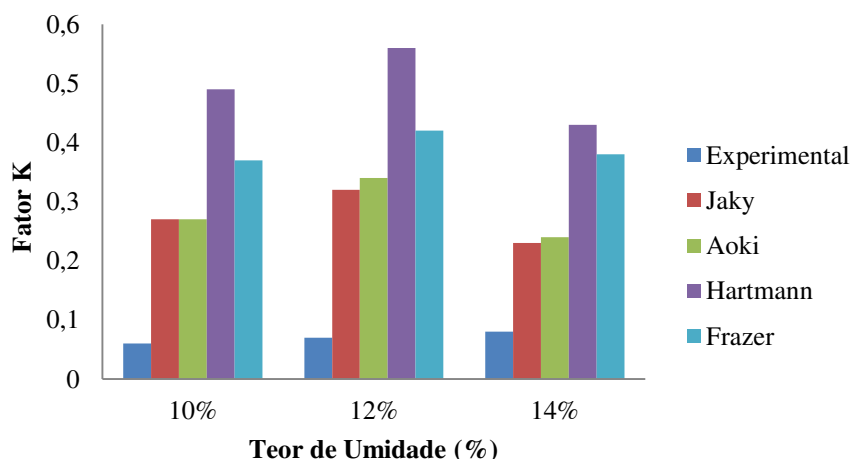


Figura 27 – Fator k para o painço

Analisando o gráfico para a equação de Aoki (1978) e Jaky (1948), no teor de umidade de 12%, o mesmo mostra uma pequena variação de 84,09 e 87,28%; constata-se, no teor de umidade de 14%, ocorreu um decréscimo nos valores obtidos pelas equações de Aoki (1978) e Jaky (1948). O fator k experimental ($k_{exp.}$), manteve-se praticamente constante para todos os teores de umidade.

Analisando a Figura 28, observa-se no resultado obtido pelas equações das normas internacionais para o painço, um decréscimo nos valores obtidos no teor de umidade de 14% (b.u.); a norma DIN 1055 (2005) foi a que apresentou maior valor e 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 86,67, 84,09 e 78,38% dos valores mais conservadores, valores esses encontrados pela equação proposta pela norma DIN 1055 (2005).

Os valores encontrados por Madrona (2008), ao estudar o fator k para soja utilizando a fórmula de Hartmann e Jaky foram os que apresentaram os menores valores enquanto neste estudo os menores valores foram para Jaky e Aoki em sua pesquisa.

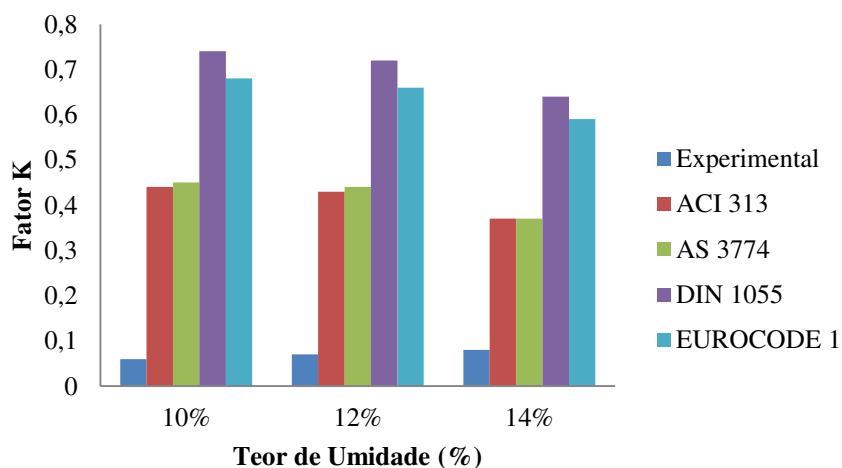


Figura 28 – Fator k para o painço

Observam-se, na Figura 29, os resultados obtidos para o fator k dos grãos de soja, que, para a equação de Hartmann (1966), foi a que apresentou os maiores valores para todos os teores de umidade, mostrando tratar-se de uma equação conservacionista em relação às outras estudadas. Os resultados do fator k experimental ($k_{exp.}$) apresentaram diferença de 82,76, 88,64 e 86,65%, para os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.) respectivamente, em relação aos resultados apresentados pela equação de Hartmann (1966).

Para a equação de Aoki (1978) e Jaky (1948) constata-se que no teor de umidade de 10% os resultados obtidos para o fator k experimental ($k_{exp.}$) foram praticamente iguais; ocorreu acréscimo no teor de umidade de 12% e os valores obtidos foram 84,85 e 80,0%; já para o teor de umidade de 14% ocorreu uma pequena variação nas equações de Aoki (1978) e Jaky (1948), de 82,76 e 76,19%.

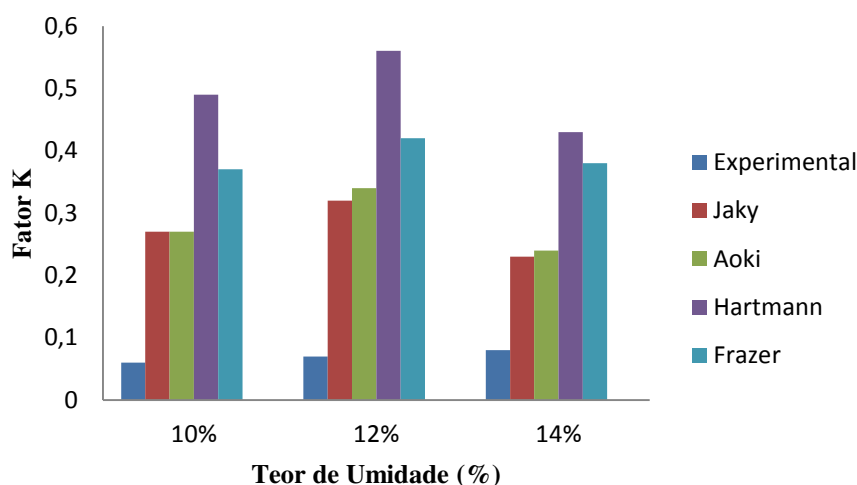


Figura 29 – Fator k para soja

Analisando a Figura 30, se encontram os resultados obtidos pelas equações das normas internacionais; para a soja se observa que com o aumento do teor de umidade, ocorreu aumento no valor de k e a norma DIN 1055 (2005) e a Eurocode 1 (1991) foram as que apresentaram os maiores valores, 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.).

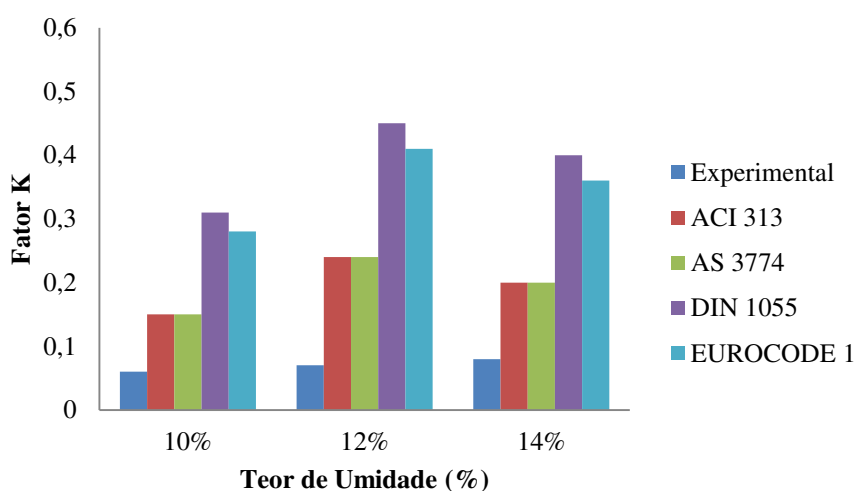


Figura 30 – Fator de k da soja

O fator k experimental ($k_{exp.}$) da soja para as normas ACI 313 (1991) e AS 3774 (1996) apresentou valores aproximadamente constantes para todos os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.) e para DIN 1055 (2005) os valores foram 83,87, 88,89 e 87,5% respectivamente, os quais são mais conservadores e encontrados pela equação proposta pela norma DIN 1055 (2005).

Segundo Haaker (1990) citado por SILVA et.al. (2003), o problema com todas as propostas para o parâmetro k é que elas foram obtidas somente com a hipótese de que o material está em estado de deslizamento e o atrito com a parede é mobilizado completamente. Tais hipóteses, segundo ele, não são necessariamente cumpridas na parede vertical da célula.

Em estudo experimental BLIGHT (1988) verificou que os valores de k para produtos granulares de fluxo livre, não variam em função da relação altura/diâmetro do silo, visto que os ângulos de atrito não variaram com a compactação do produto; na

descarga, porém, esses produtos apresentaram valor de k maior, pois ocorrem aumento das pressões horizontais e redução das pressões verticais.

Alguns valores são tabelados e há também formulações para obtenção de k , tanto para a condição de carga quanto para a descarga. FREITAS (2001) relacionou valores e equações matemáticas desenvolvidas por diferentes pesquisadores e adotados por normas estrangeiras verificando-se que a autora encontrou valores muito diferentes entre elas.

Segundo, Madrona (2008) estudando o fator k para soja utilizando as fórmulas de Hartmann e Jaky, respectivamente, foram as que apresentaram os menores valores, enquanto neste estudo os menores valores foram para Jaky e Aoki, em sua pesquisa.

Aguado (2012) relata os valores numéricos atingidos no final do enchimento e antes de iniciar a descarga, nos valores máximos obtidos durante os primeiros 10 s de descarga, o intervalo de tempo durante o qual ocorrem pressões máximas no interior do silo; constata-se que esses parâmetros aumentam os valores nos primeiros momentos de descarga; este aumento foi mais acentuado no caso do valor médio da resultante tensão vertical por unidade de perímetro em transição e da relação de pressão lateral na zona de transição (k), que aumentou 35,5% e 92,7%, respectivamente.

Uma comparação das pressões máximas obtidas durante os testes em condições estáticas e as obtidas durante a descarga usando Eurocode 1, parte 4. Os valores obtidos em testes reais eram mais baixos do que os obtidos utilizando-se os métodos de cálculo propostos no padrão europeu; desta forma a comparação entre as pressões de parede normais e o valor médio da tensão vertical resultante por unidade de perímetro em transição obtidos com os testes e os indicados pela Eurocode1, parte 4, como a maior foram observadas diferenças durante a descarga em condições normais pressões sobre a parede do cilindro, o silo tremonha junção, onde variação no que diz respeito à norma atingiu 75,7%.

6.8 Conclusões

Todos os valores do fator k calculados pelas expressões propostas pelos pesquisadores e normas internacionais, independente do teor de umidade, valores formas superiores aos encontrados pelo fator k experimental ($k_{exp.}$) para os produtos granulares estudados.

Para as formulações as que mais se distanciaram dos valores obtidos experimentalmente foram as equações de Hartmann (1966) e da norma DIN 1055(2005).

As equações que mais se aproximaram dos valores experimentais foram as de Aoki(1978), e Frazer (1948), ACI 3013 (1991) e AS 3774 (1991) respectivamente.

A comparação dos valores de k teórico com os dados obtidos nos ensaios permite apontar a formulação de Jaky em todos os produtos estudados como sendo a mais próxima da realidade para os casos estudados.

Capítulo 7

7.1 Propriedades Mecânicas

7.1.1 Generalidades

Constantes elásticas de materiais são informações de grande interesse prático que viabilizam a aplicação de equações e modelos analíticos, problemas de pequena e média complexidade através de programas de análise numérica, quanto elementos finitos e/ou elementos de contorno.

Encontra-se, na literatura técnica especializada, uma grande quantidade de valores tabelados para as propriedades elásticas de vários materiais típicos (KOBAYASHI, 1996). Entretanto, pequenas alterações na composição do material, no seu processo de fabricação ou em função de tratamentos térmicos, podem levar a variações relativamente grandes nos valores das constantes elásticas. A determinação precisa dessas constantes, especialmente o Módulo de Elasticidade e o Coeficiente de Poisson, geralmente envolvem equipamentos onerosos e procedimentos demorados.

Dentre os vários métodos utilizados para determinar as propriedades mecânicas dos materiais, ressaltam-se os métodos tradicionais mecânicos, “strain gages”, métodos dinâmicos de ressonância mecânica e os de velocidade ultrasônica (Kobayashi, 1996; SCHEREIBER, 1993).

A partir da curva de “tensão-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 vs. deformação específica”. Para grande número de materiais o comportamento inicial da curva de “tensão-deformação específica” é linear (elástico), sendo a inclinação da reta denominada módulo de elasticidade ou de Young, único para cada material (REZENDE et al., 2007).

A relação entre tensões e deformações dos materiais estruturais é representada por meio de modelos, destacando-se duas teorias: teoria da elasticidade e a teoria da plasticidade. Um material elástico é aquele que recupera sua configuração depois de cessada a aplicação do carregamento, enquanto o material plástico não.

Esses dois comportamentos são idealizados e não apresentam satisfatoriamente o comportamento real da maioria dos materiais existentes na natureza que, normalmente, podem ser representados pela combinação desses dois: os produtos granulares, por exemplo, podem ser considerados elásticos até certo valor de tensão a partir do qual se tornam perfeitamente plásticos.

O coeficiente de Poisson, ν tem efeito notável na forma em que o produto se comporta. Quanto maior o valor do coeficiente ν mais dificilmente o produto armazenado vai atingir um estado de tensão que alcance a superfície de deslizamento e, conseqüentemente, seu comportamento será elástico. Portanto, para elevados valores de utilização do comportamento elasticoplástico não é necessária (MADRONA, 2008).

7.2 Objetivo Geral

- ✓ Determinar as propriedades mecânicas de produtos granulares agroindustriais.

7.3 Propriedades Mecânicas de Materiais Isotrópicos

Em função de suas propriedades mecânicas as respostas de um material são subdivididas, basicamente, em quatro áreas de estudo (KOBAYASHI, 1996)

- elasticidade
- viscoelasticidade
- plasticidade
- viscoplasticidade

7.3.1 Comportamento $\sigma \times \epsilon$

7.3.1.1 Deformação elástica: é reversível, ou seja, quando a carga é retirada o material volta às suas dimensões originais e átomos se movem mas não ocupam novas posições na rede cristalina; em uma curva de $\sigma \times \epsilon$, a região elástica é a parte linear inicial do gráfico (Figura 31).

7.3.1.2 Deformação plástica: é irreversível, ou seja, quando a carga é retirada o material não recupera suas dimensões originais e átomos se deslocam para novas posições em relação uns aos outros.

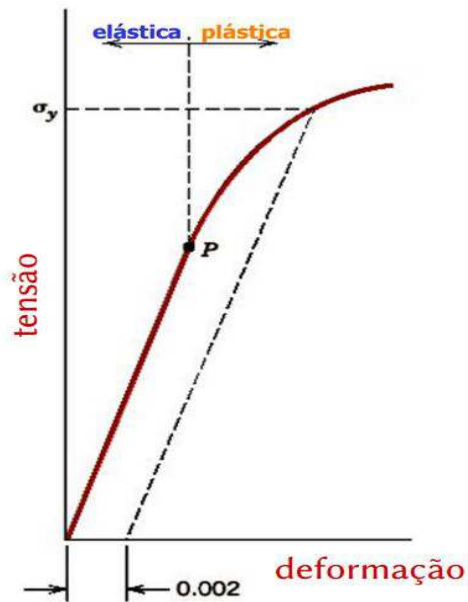


Figura 31–Deformação plástica

7.3.1.3. Comportamento $\sigma \times \varepsilon$ - Deformação Elástica

Em um teste de tração se a deformação observada no material for do tipo elástica então a relação entre a tensão e a deformação é dada pela lei de Hooke: $\sigma = E \cdot \varepsilon$. Onde E é o módulo de Young ou módulo de elasticidade e tem as mesmas unidades de σ , N/m^2 , como mostra a Figura 32.

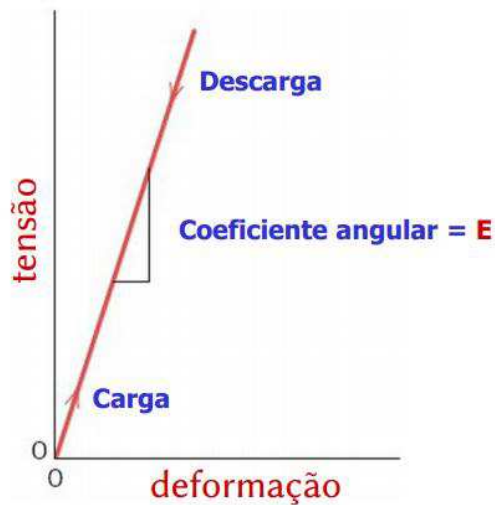


Figura 32– Tensão versus Deformação Elástica ($\sigma \times \varepsilon$)

Quando um material está sujeito a uma tensão ele se deforma. O caminho do qual o material deforma sobre uma larga escala de tensão aplicada, é mostrado na Figura 33; na região da curva delimitada por σ_z a deformação responde linearmente; se a tensão for reduzida a deformação diminuirá reversivelmente e se removendo completamente a tensão, a deformação cai a zero e a peça retorna ao estado inicial anterior à aplicação da tensão, fenômeno conhecido como deformação elástica.

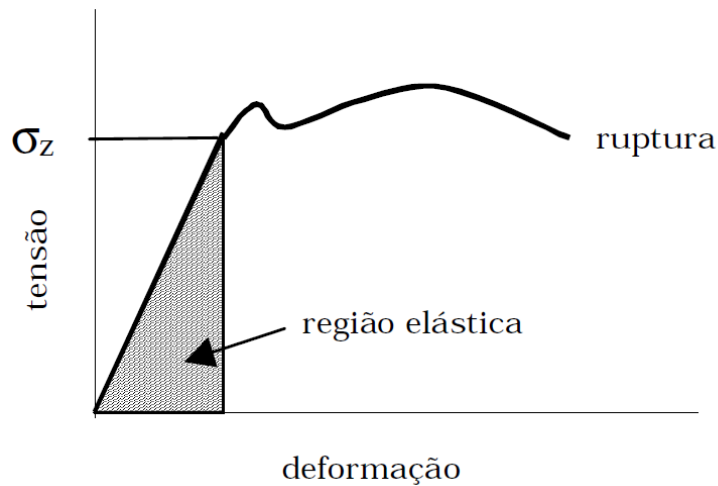


Figura 33 – Curva de tensão x deformação (σ x ϵ)

Madrona (2008) afirmou, em sua pesquisa que o produto possui comportamento real do produto armazenado, isto é, ele está sujeito a altas tensões e baixas deformações de modo que se comporta aproximadamente como um sólido; por outro lado e durante o fluxo, atuam baixas tensões e altas deformações, com o produto se comportando como fluido.

A definição de um modelo de comportamento entre tensões e deformações apresentadas pelo produto é complexa e deve considerar algumas características, como:

- deformação permanente: o produto não recupera sua configuração depois de cessada a aplicação de carregamentos
- dependência do processo de carga-descarga: não existe uma relação única entre tensões e deformações, ou seja, dado um valor de 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 um estado de tensão, isto é: com baixos incrementos de tensão o produto se deforma excessivamente;
- assimetria de comportamento tração-compressão: as forças de coesão interna conferem baixa resistência à tração nos produtos granulares que, muitas vezes, pode ser considerada desprezível.
- A relação entre tensões e deformações dos materiais estruturais é representada por meio de modelos destacando-se duas teorias: teoria da elasticidade e teoria da plasticidade; enfim um material elástico é aquele que recupera sua configuração depois de cessada a aplicação do carregamento e o material plástico não recupera.

7.4 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas inquiridas neste tópico foram: o módulo de Young (módulo de elasticidade, E), o coeficiente de Poisson (ν) e o ângulo de dilatação (ψ).

7.4.1 Módulo de elasticidade (E)

Entre as noções mais elementares de tensão de um material o módulo de elasticidade ou módulo de Young (E), é o mais considerado por ser um dos parâmetros mais importantes na engenharia de projetos (SCHEREIBER et al. 1973; (CALLISTER, 1997). O módulo de elasticidade é definido como sendo a constante de proporcionalidade entre a tensão e a deformação no regime elástico.

O módulo de Young ou módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que proporciona a medida da rigidez de um material sólido: é também, um parâmetro fundamental para a engenharia e aplicação de materiais, visto que estar associado à descrição de várias outras propriedades mecânicas, como, por exemplo, a tensão de

escoamento, a tensão de ruptura e a variação de temperatura crítica para a propagação de trincas sob a ação de choque térmico, etc.

É uma propriedade intrínseca dos materiais dependente da composição química microestrutura e de defeitos (poros e trincas), que pode ser obtida da razão entre a tensão exercida e a deformação sofrida pelo material. Tensão corresponde a uma força ou carga por unidade de área aplicada sobre um material, e deformação é a mudança nas dimensões, por unidade da dimensão original; assim, o módulo de Young é dado por:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (35)$$

onde:

E é o módulo de elasticidade ou módulo de Young, medido em pascal,

σ é tensão aplicada, medida em pascal,

ε é a deformação elástica longitudinal do corpo de prova (adimensional).

Pode-se reescrever a Equação (35) da seguinte forma:

$$E = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta l}{l_0}} = \frac{F \cdot l_0}{A \cdot \Delta l} \quad (36)$$

em que:

F é a força, medida em N.

A é a área da secção através da qual é exercida a tensão, e se mede em m².

Δl é a variação do comprimento, medido em m.

l_0 é o comprimento inicial, medido em m.

7.4.2 Coeficiente de Poisson (ν)

O coeficiente de Poisson (ν), é definido como sendo a relação entre a deformação elástica transversal (ε_y) pela deformação elástica longitudinal (ε_z), ou seja:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (37)$$

Observa-se na Equação (37) o sinal negativo significa que enquanto o corpo se alonga no sentido longitudinal, ele se contrai no sentido transversal e vice e versa.

O coeficiente de Poisson varia com o tipo de material, como verifica na Tabela 16 e se apresenta, para a generalidade dos materiais, valores positivos; entretanto, em um tipo de materiais designados por *auxéticos*, o coeficiente de Poisson apresenta valores negativos significando que quando se alonga um pedaço de material *auxético*, as dimensões da sua secção transversal aumentam, contrariamente ao que ocorre com a generalidade dos materiais.

Tabela 16 – Coeficientes de Poisson de vários materiais

Coeficientes de Poisson		
Material	Máximo	Mínimo
Borracha	0,50	0,45
Borracha dura (Ebonite)	0,43	0,49
Borracha termoplástica	0,50	0,45
Cerâmico	0,37	0,10
Compósito	1,97	-0,414
Madeira	0,82	0,009
Metais e ligas	0,45	0,14
Plástico	0,61	0,25
Vidro	0,28	0,16

Para o caso biaxial, no qual tensões agem em mais de um eixo simultaneamente, por exemplos eixos “x” e “y”, a relação tensão deformação para um material isotrópico, esta relacionada à expressão da lei de Hook biaxial (DALLY et al., 1991), ou seja:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} (\sigma_{xx} - \nu \sigma_{yy}) \qquad \varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} (\sigma_{yy} - \nu \sigma_{xx}) \qquad (38)$$

7.4.3 Ângulo de dilatação (ψ)

A dilatação é definida como incremento volumétrico quando o material é submetido ao cisalhamento. Esta dilatação está relacionada ao deslocamento através do ângulo de dilatação (ψ), que é o ângulo entre a tangente do plano de cisalhamento e a superfície horizontal de cisalhamento (Figura 34). O ângulo de dilatação é um novo parâmetro que começou a ser considerado quando se desejou modelar o comportamento elasto-plástico de produtos sólidos em cálculos de pressões, em produtos armazenados.

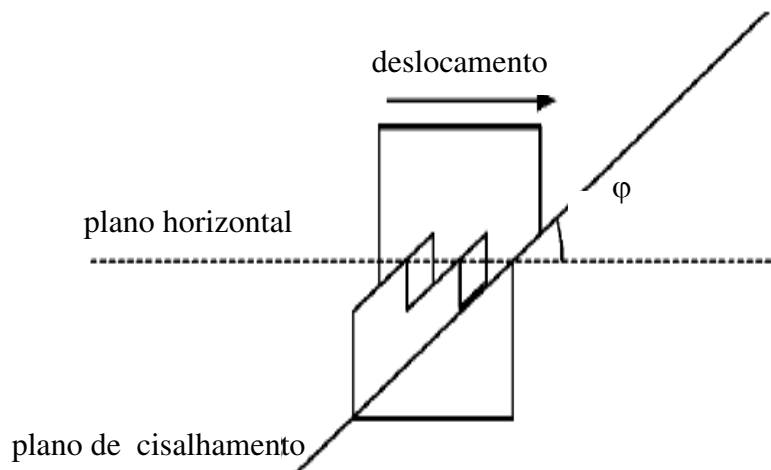


Figura 34 – Efeito da dilatação em produto sólidos

7.5 Fatores que Afetam as Constantes Elásticas

Existem poucos materiais elasticamente isotrópicos cujas deformações produzidas por uma tensão particular são independentes da direção de sua aplicação; vidro, por exemplo, é uma exceção importante, enquanto muitos materiais de engenharia são considerados como isotrópicos para o propósito de análises da deformação elástica.

Os principais fatores que afetam as constantes elásticas são:

- temperatura
- composição das fases constituintes
- porosidade
- direção cristalográfica

Quando ocorre aumento na temperatura de materiais observa-se leve diminuição do módulo de elasticidade, resultado de um aumento no espaçamento interatômico devido à expansão térmica; muitos materiais encontrados na engenharia possuem mais do que uma composição ou fase e tem módulo de elasticidade intermediário entre o módulo das fases constituintes.

A Porosidade também afeta o módulo de elasticidade, resultando sempre em decréscimo de seu valor. Em diversos trabalhos estudada uma formulação visando estimar o valor das constantes elásticas de materiais porosos (YU et al.,1990; GRIFFITHS, 1986).

7.6 Determinação de Propriedades Elásticas dos Materiais

A determinação de propriedades elásticas dos materiais pode ser realizada através de dois métodos (KOBAYASHI, 1996): do estático ou do dinâmico, em que o primeiro basicamente, consiste em submeter um objeto a uma carga estática conhecida e medir sua deformação em função desta carga, enquanto o dinâmico consiste em submeter o objeto a um movimento harmônico na sua frequência de ressonância e, através desta frequência associada à geometria e à massa do objeto, correlacionar as constantes elásticas. Outra forma do método dinâmico é submeter o objeto a uma velocidade ultrassônica em uma de suas extremidades e medir a velocidade resultante no seu outro extremo; observando a razão das velocidades na entrada e na saída do objeto, as constantes elásticas são determinadas.

Esses métodos são implementados por diversas técnicas dentro das diferentes áreas da engenharia, tais como:

- medição por máquinas de ensaio (tração, compressão, flexão, torção ou cisalhamento).
- medição por extensômetros ou “strain gages”
- medição através de ensaios dinâmicos
- medição por análise modal
- medição acústica.
- medição óptica (interferometria a laser, holografia, fotoelasticidade e Moiré)

A escolha do melhor método e da técnica de medição, não é uma tarefa trivial; em linhas gerais, a aplicação de determinado método depende do grau de incerteza que se deseja no resultado de medição, das facilidades encontradas nos laboratórios e dos investimentos que se deseja fazer.

HENRY et al. (2000a), observaram, estudando a resistência da soja a compressão em três orientações e quatro umidades que, ao comprimir o grão, a força de ruptura, perpendicular à divisão do cotilédones, foi maior, comparada com as outras orientações e que a habilidade da soja em resistir à compressão diminui com o aumento do teor de água; além disto os autores verificaram que maiores velocidades de compressão requerem também maiores forças de ruptura e os grãos colhidos na maturidade fisiológica requerem menor força de ruptura e maior deformação, comparados àqueles colhidos cinco semana após a maturidade fisiológica.

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” e para grande número de materiais o comportamento inicial curva “tensão deformação específica” é linear (elástico), sendo a inclinação da reta denominada de módulo de elasticidade ou de Young, único para cada material.

7.7 Material e Métodos

O trabalho foi realizado no Laboratório de Resíduos e Construções Rurais e Ambiência (LaCRA), do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande – PB, da Universidade Federal de Campina Grande.

7.7.1 Produtos Utilizados nos Ensaios

Foram determinadas as propriedades físicas e de fluxo de grãos de milho, painço e soja, em função de três teores de umidade (10,12 e 14%) e os produtos foram adquiridos no comércio de Campina Grande - PB.

Os parâmetros de elasticidade e plasticidade foram determinados pela compressão dos grãos com base na metodologia proposta por Sawicki (1994) cujo procedimento consistiu de duas etapas: carregamento (OA) e descarregamento, esse se subdividiu-se em outras duas partes (AB e BC), como constatado na Figura 35.



Figura 35 – Diagrama de carga e descarga e orientação cartesiana

O carregamento (OA) é dotado de duas fases simultâneas no material: da fase reversível (elástica) e da fase irreversível (plástica), baseadas na teoria elastoplástico.

O fator K_0 , calculado nesta fase, compactação, representa a relação entre a tensão horizontal, σ_x , e a tensão vertical, σ_y , com uma dependência linear, como descrito pela equação a seguir.

$$\sigma_x = k_0 \sigma_y \quad (39)$$

onde:

σ_x - Tensão horizontal, Pa

σ_y - Tensão vertical, Pa

k_0 - Coeficiente de dependência linear

Nesta fase a deformação total, ε_y , é composta de deformação plástica, ε_y^p , e deformação elástica, ε_y^e , dado por:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_y^p + \varepsilon_y^e \quad (40)$$

então,

$$\varepsilon_y = D_1 \ln(1 + D_2(\sigma_y)^\alpha) + \frac{\sigma_y}{E} \left(1 - \frac{2\nu^{*2}}{1-\nu^*}\right) \quad (41)$$

endo,

$$\nu^* = \frac{k_0}{1+k_0} \quad (42)$$

donde:

ε_y - Deformação total, mm

ε_y^p - Deformação plástica, mm

ε_y^e - Deformação elástica, mm

σ_y - Tensão vertical, Pa

E - Módulo de elasticidade, kPa

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

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

α - Parâmetros do modelo determinado experimentalmente

A segunda etapa do ensaio (descarga) se divide em dois estágios: AB e BC, sendo AB, a fração linear do gráfico (Figura 31), o qual é caracterizado pela deformação elástica; nesta fase são extraídas as informações sobre as constantes elásticas (módulo de elasticidade(E), e coeficiente de Poisson, (ν)); já o segundo estágio é caracterizado pela deformação elástica e plástica; considerou-se que o material é reversível, sendo então, regido pela lei de Hooke:

$$\varepsilon_x^e = \frac{1}{E}[(1 - \nu)\sigma_x - \nu\sigma_y] \quad (43)$$

$$\varepsilon_y^e = \frac{1}{E}[\sigma_y - 2\nu\sigma_x] \quad (44)$$

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

$$\varepsilon_y = \varepsilon_y^e \quad (45)$$

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

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^p + \varepsilon_x^e = 0 \quad (46)$$

então, a equação 5 é reduzida à equação 9:

$$\nu \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (47)$$

Substituindo a equação 9 na equação 6, obtém-se:

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} \left(1 - \frac{2\nu^2}{1 - \nu} \right) \quad (48)$$

As constantes elásticas, determinadas a partir dos dados experimentais da fase linear de descarga é obtidas pela relação entre a tensão horizontal (σ_x) e a tensão vertical (σ_y), são consideradas constantes (estado elástico de tensão); através do processo de regressão linear dos valores experimentais determinou-se, pela inclinação da linha reta, a relação apresentada na equação a seguir:

$$A = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \frac{\nu}{(1 - \nu)} \quad (49)$$

A partir da determinação de A o coeficiente de Poisson (ν), é encontrado através da equação 49.

$$\nu = \frac{A}{1 + A} \quad (50)$$

O módulo de elasticidade (E), foi estimado pela relação $\varepsilon_y(\sigma_y)$ da equação 50, com os valores experimentais de ε_y e σ_y e pelo ν determinado como descrito acima.

O segundo estágio, BC, caracterizado pela parte não-linear de descarga, se inicia quando a tensão vertical, σ_y , é menor que o valor da tensão horizontal, σ_x ; neste estágio as deformações elásticas e plásticas coexistem simultaneamente assumindo 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 a seguir:

$$\varepsilon_y = D_3 \ln [1 + D_4(\sigma_y)^\beta] + D_5\sigma_y \quad (51)$$

onde:

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

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

O ângulo de dilatação 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 o deslocamento horizontal (Eq. 51).

$$\psi = \frac{\frac{\Delta\varepsilon_y}{h_0}}{\frac{\Delta\varepsilon_x}{L}} \quad (52)$$

onde:

ψ - Ângulo de dilatação, ($^\circ$)

$\Delta\varepsilon_y$ - Variação na deformação vertical ao longo do tempo, (m)

$\Delta\varepsilon_x$ - Variação na deformação horizontal ao longo do tempo, (m)

h_0 - Altura inicial da amostra, (m)

L - Comprimento inicial da amostra, (m)

7.8 Confeção da Célula de Propriedades Mecânicas

Para a aquisição das propriedades mecânicas foi construído, instrumentado e ensaiado, um protótipo de célula de compressão uniaxial – CCU; as principais informações inerentes ao protótipo serão descritas neste tópico.

A célula de compressão uniaxial (CCU) é composta 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 confeccionou-se em chapa de aço de espessura 6,35 mm (1/4'). A utilização desta espessura se baseou na necessidade de partes rígidas para que não sofressem deformações e 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, posicionadas em suas uniões, para fixação, quatro barras de alumínio como é apresentado na Figura 36.

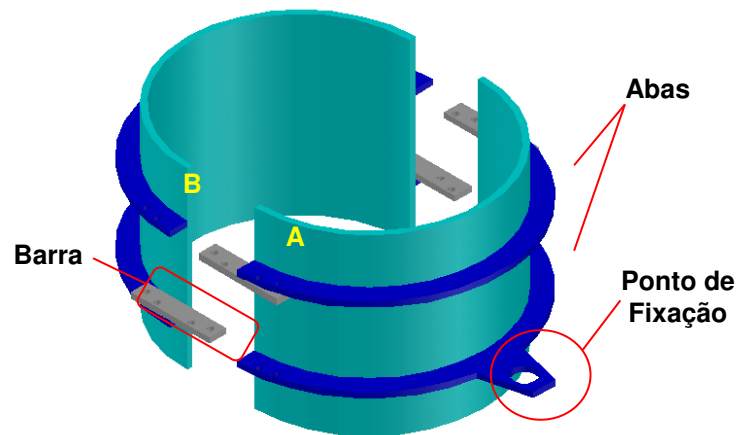


Figura 36- Célula de Carga Uniaxial

Fazem parte deste conjunto duas tampas (Superior – com duas alças e Inferior – sem alças), circulares de mesmo material com diâmetro de 250,0 mm, às quais foi apoiada uma célula de carga (modelo LT 6/3; FS: 30 kN da marca KYOWA) para registrar a força de compressão e um transdutor LVDT (marca KYOWA, capacidade máxima de 30 mm) para registrar o deslocamento vertical.

A CCU foi apoiada em uma base de chapa de aço de 12,7 mm (1/2”), com 390 mm de comprimento e 500 mm de largura; sobre esta, foram engastados três pinos, equidistantes do centro e distantes entre si 120° , sendo um deles ponto fixo para ancoragem da CCU e os outros dois utilizados como apoio (Figura 37a e 37b).

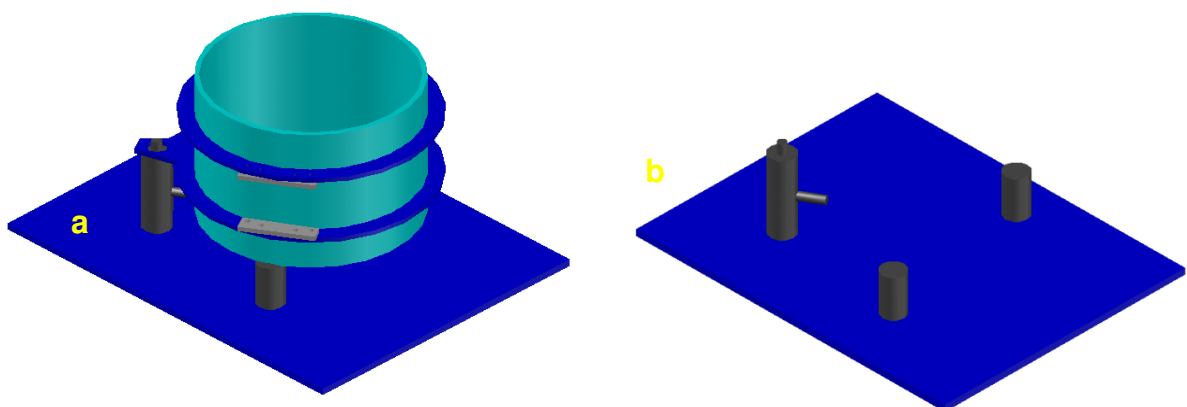


Figura 37 - a) CCU apoiada na base; b) Disposição dos pinos na base

Com vista à união dos semicírculos e à fixação dos extensômetros, quatro barras de liga de alumínio foram utilizadas, 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 da CCU por meio de quatro parafusos tipo além com cabeça de diâmetro $\frac{1}{4} \times \frac{3}{4}$ de comprimento e arruelas de pressão.

Com auxílio da máquina universal de ensaios determinou-se o módulo de elasticidade das barras ($E = 16,8436$ GPa), através do ensaio de tração realizado em triplicata, conforme as Figuras 38a e 38b.

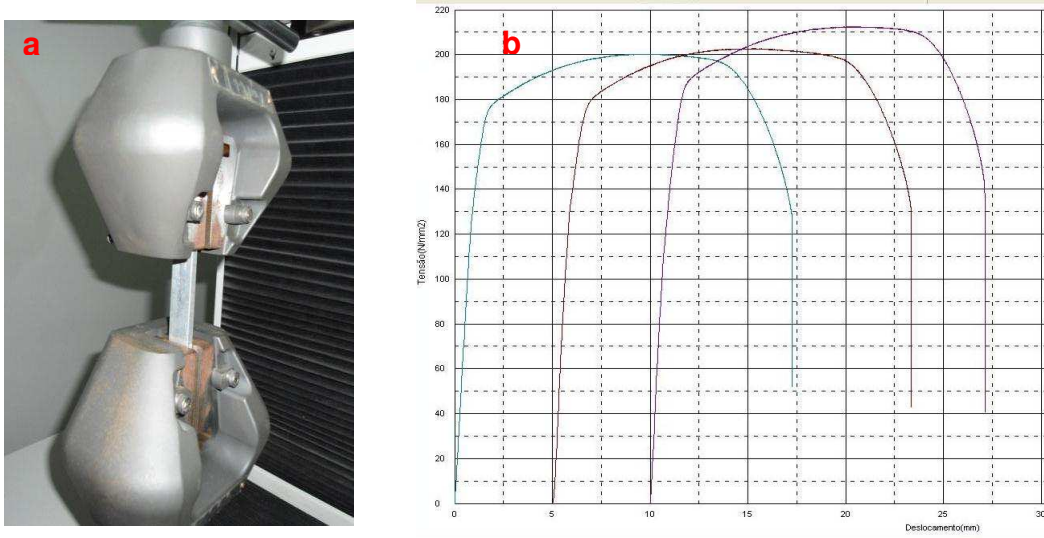


Figura 38 - a) Ensaio de Tração; b) Curvas características do ensaio de tração

7.9 Instrumentação e Aquisição de Dados

7.9.1. Extensômetros

Esses extensômetros foram posicionados 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 de deformação do material.

Anterior e posteriormente ao processo de colagem foi realizada, com auxílio de um multímetro, a verificação da resistência dos extensômetros para aferição de prováveis danos aos seus micros filamentos.

Para o procedimento de colagem dos extensômetros na superfície da barra foram obedecidas as seguintes etapas:

- a) Com a superfície da barra já limpa, aplicou-se solvente e ácido clorídrico (HCl) P.A.; para a remoção de gordura (Figura 39), realizou-se procedimento de secagem com papel filtro;



Figura 39 - Limpeza da superfície para aplicação do extensômetro

- b) A superfície foi lixada com lixa nº 100 para aumentar a rugosidade da superfície;
- c) Novamente foi aplicado o procedimento (a)
- d) Para que fosse feita a marcação da posição do extensômetro, foram utilizados régua e estilete
- e) Com auxílio de fita adesiva da marca Durex Produtos Químicos, esta primeiramente aderiu-se ao extensômetro e logo após foi posicionada no local de colagem
- f) A fita foi fixada em uma de suas extremidades e a outra suspensa para aplicação da cola adesiva Super Bond Original, da marca LOCTITE, no extensômetro e na barra;
- g) Após o procedimento (f) a fita adesiva teve a extremidade livre presa à barra (Figura 40), efetuando-se pressão sobre o extensômetro para expulsão do ar e reação química da cola e processo de cura;



Figura 40 – Procedimento de colagem do extensômetro

- h) Ao final do período de 24 horas foi retirada a fita adesiva;

- i) Aplicou-se silicone (Figura 41), para proteção do extensômetro; precavendo-se de possíveis danos ocasionados com, por exemplo, a exposição a ambientes úmidos e quentes;



Figura 41 – Aplicação de Silicone.

7.9.2. Calibração dos sensores de deslocamento e de força

Para aquisição de dados da presente pesquisa utilizou-se um sistema de medição de variáveis mecânicas e métricas, a partir de variações de potenciais elétricos de Modelo Spider8 600Hz de fabricação da HBM, com 8 entradas (Figura 43).



Figura 42 - 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 calibração.

Para calibração 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, a qual teve seu sensor de deslocamento zerado; a partir disto, foi empregado um deslocamento conhecido para que o sistema Spider8 captasse as variações elétricas e os relacionasse às variações métricas podendo, assim, criar uma representação confiável da realidade expressa no ensaio.

A Figura 43 ilustra uma das etapas de calibração do LVDT com as variações métricas/variações elétricas obtidas ao longo deste procedimento.

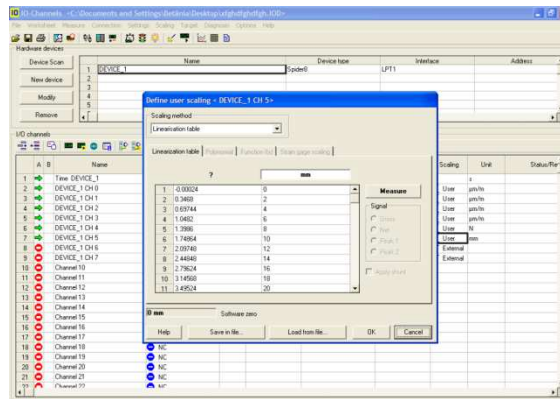


Figura 43 - Relação métrica/elétrica capturada pelo Spider8

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-se uma relação confiável entre carga/variação elétrica.

A Figura 44 ilustra uma das etapas de calibração da célula de carga visualizando-se a relação entre carga e variação elétrica, interpretada pelo Spider8.

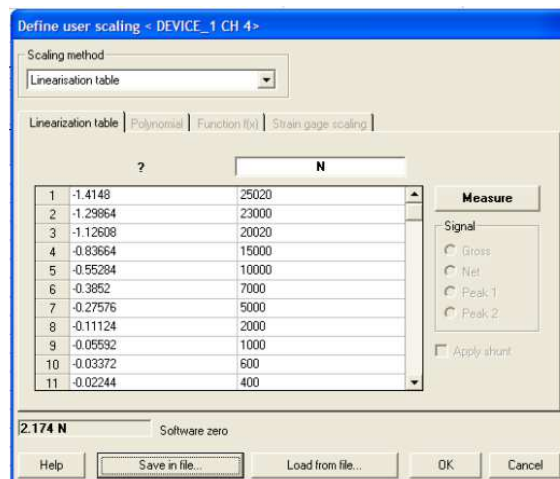


Figura 44- Relação mecânica/elétrica capturada pelo Spider8

7.9.3 Programação do sistema de aquisição de dados

Com os sensores devidamente calibrados foi realizada a configuração do sistema 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 45.

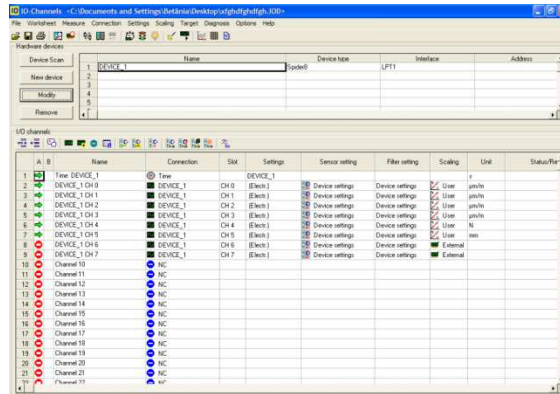


Figura 45 - Interface de configuração do Catman 4.5

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

A interface final do software apresenta, ao usuário, um quadro na parte superior esquerda da tela, o qual este 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 46; finalmente, anterior ao ensaio mecânico os equipamentos foram montados, testados e zerados (Figura 46).

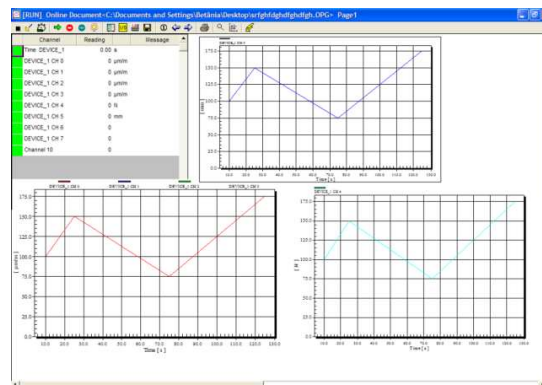


Figura 46 - Interface final de programação do Catman 4.5

7.9.4. Procedimento experimental

Este tópico abordará os procedimentos empregados para aquisição de dados da pesquisa. Inicialmente, os produtos foram adquiridos no mercado local, e levados ao laboratório para determinação do conteúdo de água; e os produtos que não estavam na faixa do teor de água estipulado previamente para pesquisa, eram colocados ao ar livre para absorver água e/ou levados à estufa para sua perda.

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

Uma fração do material foi liberada de altura conhecida sobre uma superfície rugosa, onde este formou um talude; através de uma régua e um transferidor realizou-se a leitura do ângulo de repouso, e logo após, realizou-se o teste do teor de umidade.

Para obtenção dos dados das propriedades mecânicas realizados no Laboratório de Materiais Recicláveis e Resíduos Sólidos, o qual foi conectado a um computador com o software Catman 4.5; com o devido programa já instalado ao sistema de medição de variáveis métricas e mecânicas a partir de variações de potenciais elétricos o Spider8, ilustrada na Figura 47a; logo após foi efetuado 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 47b).



Figura 47 – a) Computador ligado ao Spider e o equipamento de determinação das propriedades mecânicas. b) Equipamento das propriedades mecânicas sobre a base da máquina de ensaio universal

A CCU foi enchida concentricamente e o produto, nivelado à superfície; foi colocada à tampa superior e posicionados o LVDT e a célula de carga, conforme as Figuras 48a e 48b, que ilustram um procedimento de ensaio de um produto.



Figura 48 - a) Produto nivelado. b) Ensaio de compressão em andamento

A máquina universal de ensaio do modelo descrito 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 braço 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, o botão de parada na máquina universal de ensaio era acionado e imediatamente o braço da máquina era submetido ao retorno do percurso (Figura 49), indicando-se o ensaio em andamento.

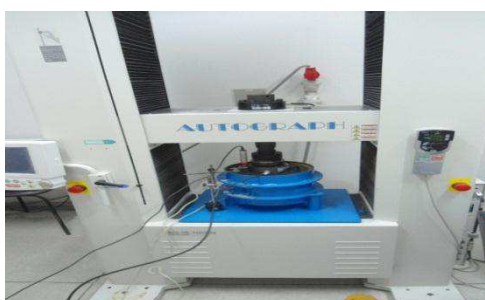


Figura 49 - Ensaio de compressão em andamento

7.9.5 Resultados e Discussões das Propriedades Mecânicas

Neste capítulo são apresentados os resultados das propriedades mecânicas dos grãos de milho, painço e soja, com os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.) para quatro cargas de compressão (5, 10, 15 e 20 kN).

7.9.5.1 – Milho

7.9.5.1.1 - Curvas de tensão x deformação para grãos de milho

As Figuras 50, 51 e 52 indicam as curvas plotadas com os valores médios de tensão (σ_y) versus deformação (ϵ_y) dos ensaios mecânicos para grãos de milho.

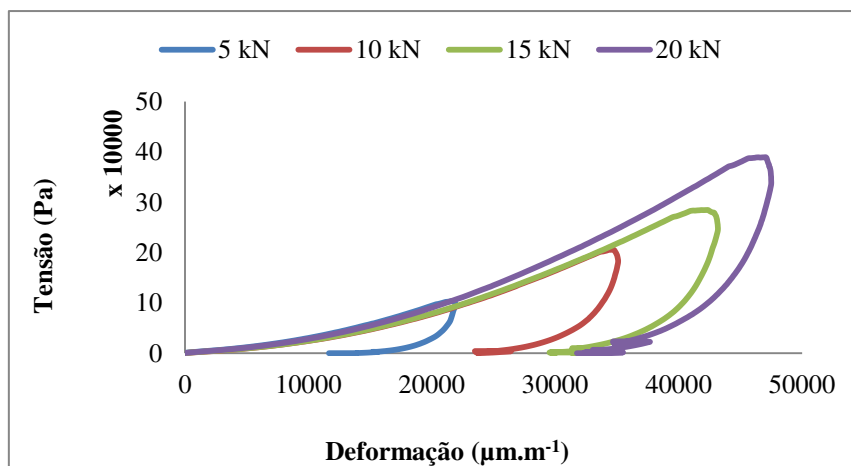


Figura 50 – Curvas de tensão x deformação dos grãos de milho com 10% de umidade

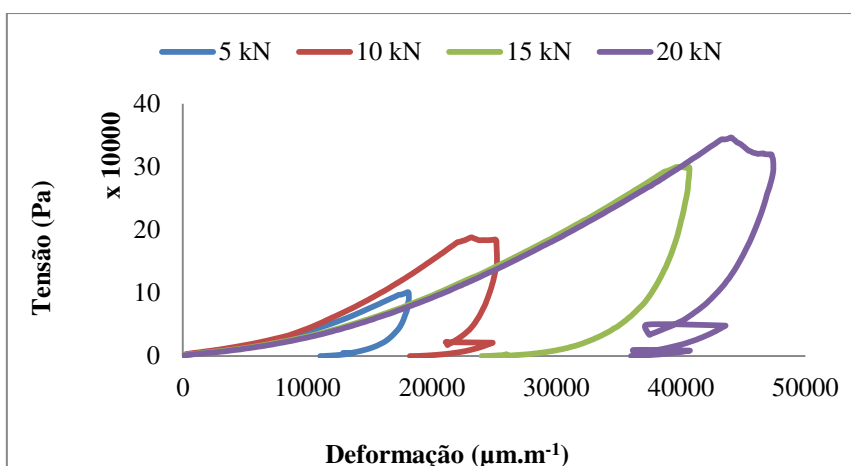


Figura 51 – Curvas de tensão x deformação dos grãos de milho com 12% de umidade

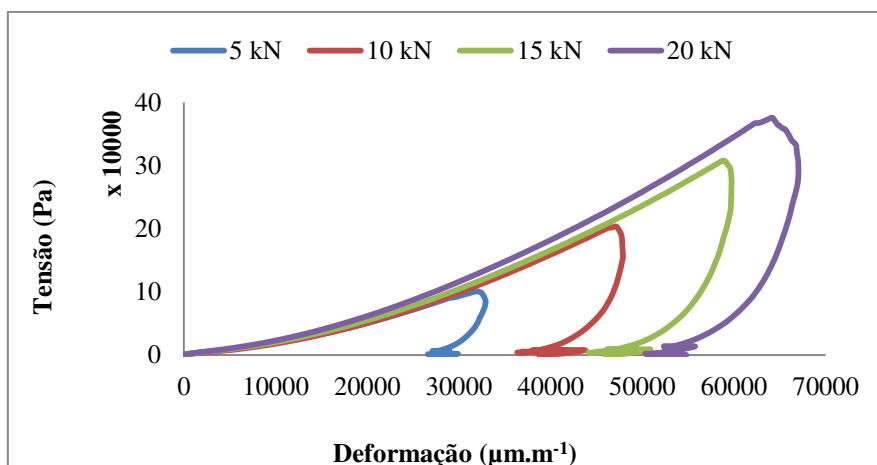


Figura 52 - Curvas de tensão x deformação dos grãos de milho com 14% de umidade

A Figura 50 trata das curvas obtidas do teor de umidade de 10% (b.u.) que apresentam, na primeira etapa (carregamento) uma sobreposição nas curvas das cargas de 5 e 10kN em relação às outras curvas.

Para o teor de umidade de 12% (b.u.), a sobreposição das curvas ocorre para as cargas de 15 e 20kN na fase de carregamento; já para o teor de umidade de 14% (b.u.); na Figura 52 a sobreposição ocorre nas de 5, 10 e 15kN, diferenciando-se levemente da curva relativa a carga de 20kN.

7.9.5.1.2 - Coeficiente de Poisson dos grãos de milho

Na Tabela 17 estão os resultados obtidos para o coeficiente de Poisson dos grãos de milho para a etapa de carregamento (ν^*) e descarregamento (ν). O Coeficiente de Poisson do milho foi determinado com base no modelo proposto por Sawicki (1994), em que o ensaio se distingue por duas fases: pelo carregamento e através do descarregamento.

Tabela 17 - Coeficiente de Poisson nas fases de Carregamento e Descarregamento para grãos de milho

Produto	Teor de	Parâmetros	Cargas de Compressão
---------	---------	------------	----------------------

Umidade (% - b.u.)		5 (kN)	10 (kN)	15 (kN)	20 (kN)	
Milho	10	v*	0,910	0,924	0,925	0,915
		v	1,62	2,84	4,03	5,19
	12	v*	0,696	0,936	0,930	0,937
		v	0,52	0,88	0,80	0,84
	14	v*	0,904	0,925	0,917	0,896
		v	18,81	2,84	4,03	5,18

Legenda: Poisson (v*) – carregamento - adimensional
Poisson (v) – descarregamento - adimensional

Para o teor de 10% (b.u.) o coeficiente Poisson (v*) para o carregamento apresentou comportamento linear e sem variação entre as cargas; para o coeficiente de Poisson calculado para o descarregamento (v) observa-se que, com o aumento das cargas e do teor de umidade, ocorreu aumento no coeficiente de Poisson, conforme representado na Tabela 17.

Analisando o teor de umidade de 12% na carga 5kN observa-se diminuição no coeficiente de Poisson no carregamento (v); para as outras cargas não ocorreu variação; esta diminuição também foi observada no descarregamento, na mesma carga e no teor de umidade citados.

Durante o carregamento (v*) no teor de umidade de 14% (b.u.) o coeficiente de Poisson apresentou diminuição nos resultados na carga de 20kN; já para o descarregamento constatou-se aumento em seus resultados e os maiores valores foram para as cargas de 5 e 20 kN e os menores para as cargas de 10 e 15 kN.

Molenda e Stasiak (2002) obtiveram, pesquisando o comportamento das propriedades elásticas com aplicação de carga uniaxial de 100 kPa, o seguinte resultado para coeficiente Poisson de grãos de trigo: o valor máximo foi de 0,22 e o mínimo de 0,15 no teor de umidade de 10%; comparando este resultado com o obtido na presente pesquisa para o mesmo teor de umidade em grãos de milho, verifica-se que o maior valor foi 5,19 na carga de 20kN e o menor foi 1,62 na carga de 5kN.

Stasiak (2003) encontrou, em seus estudos com os grãos de trigo com 10% de umidade, o valor máximo de 0,18.

7.9.5.1.3- Módulo de elasticidade calculado (E) para os grãos de milho

Na Figura 53 observa-se que os resultados obtidos para o módulo de elasticidade calculado (E) variam em todas as cargas e teores de umidade ensaiados.

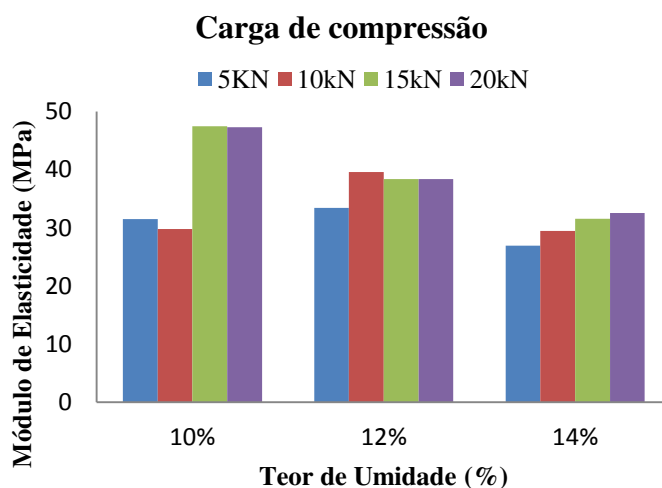


Figura 53: Módulo de Elasticidade Calculado para o milho

Os maiores valores do módulo de elasticidade calculado (E) foram obtidos no teor de umidade de 10% e carga de 15 kN e os menores valores na carga de 5kN. Avaliando-se que os maiores resultados obtidos foram para as cargas de 10, 15 e 20 kN, obtiveram-se os seguintes resultados 124,29; 130,25 e 116,58MPa respectivamente, para os teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.).

O módulo de elasticidade calculado (E) com teor de umidade de 12% e na carga de 10kN apresentou valores superiores em relação as outras cargas; os módulos de elasticidade calculados (E) apresentaram comportamento semelhante para todos os teores de umidade, e os valores obtidos diminuíram com o aumento da carga.

O teor de umidade de 14% (b.u.) apresentou, nas cargas de 5, 15 e 20kN, os maiores valores, de 80,58, 102,16 e 116,58, enquanto para 10kN apresentou os seguintes valores de 130,25 no teor de umidade de 14%.

Na Figura 54 observa-se que os resultados obtidos para o módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$) foram superiores aos calculados.

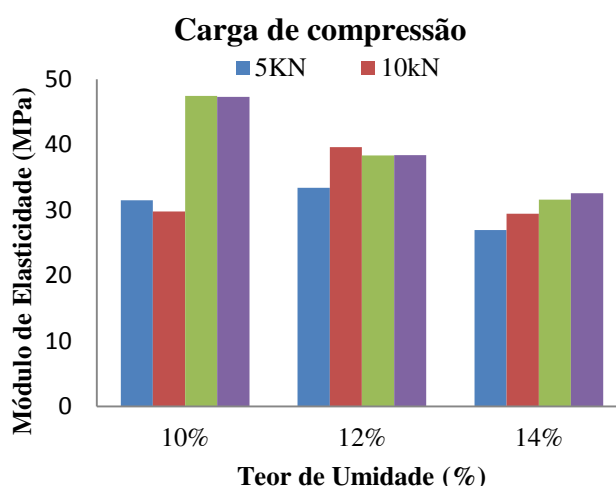


Figura 54: Módulo de Elasticidade Experimental para o milho

Observa-se também que no teor de umidade de 10% nas cargas de 15 e 20kN obtiveram os maiores resultados e o menor resultado foi na carga de 10kN, respectivamente. Para o teor de umidade de 12%, observa-se que 39,62 foi o maior valor na carga de 10kN e o menor foi de 33,42 na carga de 5kN.

Nota-se, no teor de umidade de 14% que com o aumento das cargas de compressão, ocorreu aumento no módulo de elasticidade experimental, apresentaram conformidade ao seu comportamento com aumento dos valores ao ser acrescentado cargas respectivamente, onde os menores valores foram na carga de 5kN e os maiores em 20kN.

Stasiak et. al. (2003) utilizaram o método acústico para determinar o módulo de elasticidade dos grãos de trigo e canola sob umidade de equilíbrio. Os testes foram realizados com pressão máxima de 100 kPa, típico para muitas situações práticas. Os valores do Módulo de Elasticidade (E) foram encontrados variando de 6,6 a 23,6 kPa; com o aumento do teor de umidade dos grãos, os valores do módulo de elasticidade(E) diminuíram de acordo com aqueles recomendados pela norma polonesa, bem como com aqueles relatados por vários autores. Observando-se no trabalho que no teor de 12%

para o milho ocorreu uma redução no módulo de elasticidade nas cargas de 5, 10 e 20kN.

7.9.5.1.4. Ângulo de dilatação dos grãos de milho (ψ)

Na Figura 55 se encontra o resultado ângulo de dilatação (ψ) do milho, além do teor de umidade, com 10% (b.u.); o maior ângulo de dilatação foi igual a $32,02^\circ$ para a carga de 5kN e o menor de $28,24^\circ$ para a de 15 kN. No teor de umidade de 12%, o menor valor foi $19,84^\circ$ na carga de 10kN igual e o maior igual a $24,82^\circ$ para a carga de 15kN.

Para o teor de 14% o maior valor do ângulo foi de $39,22^\circ$ na carga de 5kN e de $29,75^\circ$ o menor ângulo na carga de 15kN.

Os dados obtidos dos ângulos de dilatação (ψ) para o milho apresentaram tendência semelhante até a carga de 15 kN, para todos os teores de umidade.

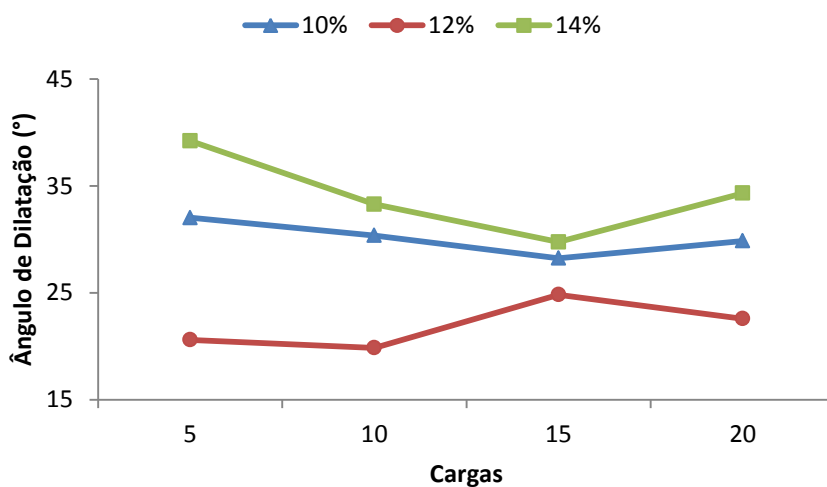


Figura 55. Ângulo de dilatação do milho(ψ)

Ayuga (2001) apud Guaita et. al. (2003), descreve que o ângulo de dilatação é um dos dados necessários quando se usa o critério do elástico-plástico de Drucker-Prager e para as definições das regras de fluxo que determinam a direção da plasticidade.

Os grãos de milho estão dentro da classificação de Ayuga (2001) apud Guaita et. al. (2003), ao afirmar que o ângulo de dilatação (ψ) é menor que o ângulo de atrito interno (ϕ) ocorrendo menos expansão volumétrica.

7.9.5.2 Painço

7.9.5.2.1 Curvas de tensão x deformação para grãos de painço

Os valores médios de tensão (σ_y) versus deformação (ϵ_y) do ensaio mecânico do painço estão plotados nas Figuras 56, 57 e 58; essas curvas mostram seu comportamento para os quatro níveis de cargas e nos respectivos teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.).

Observa-se, na Figura 56, a representação das curvas obtidas no ensaio de compressão, as quais tiveram comportamento similar na primeira etapa no carregamento, mostrando seus picos quando aplicadas novas cargas; observa-se acréscimo na curva de 15kN; para as cargas de 5, 10 e 20kN, observou-se sobreposição dessas curvas no carregamento.

Na Figura 57 as curvas de tensão x deformação do painço apresentam três sobreposições na primeira etapa do ensaio, que caracteriza o carregamento nas cargas de 5, 10 e 20kN.

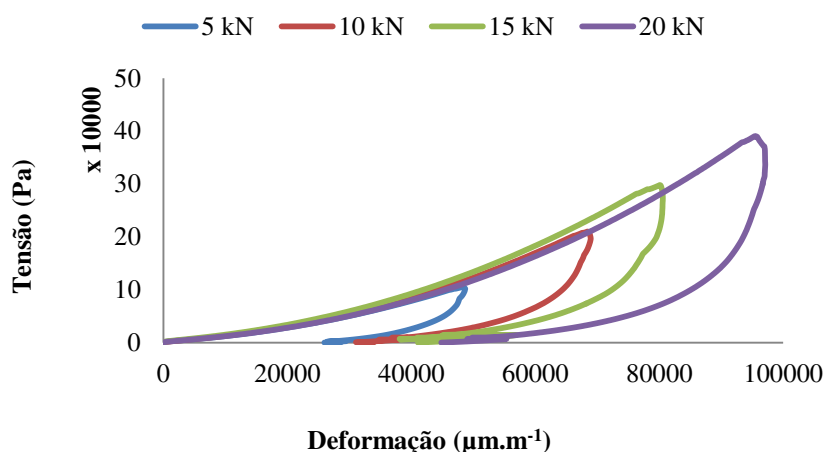


Figura 56 - Curvas de tensão x deformação do painço com 10% de umidade

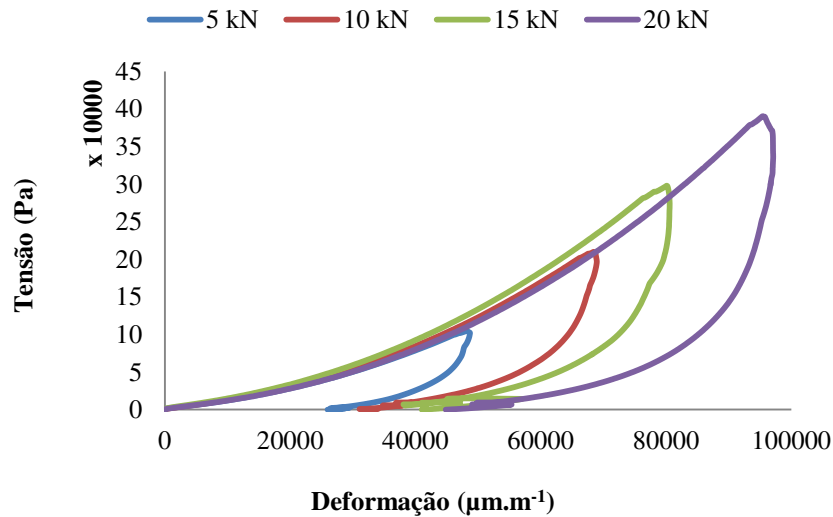


Figura 57 - Curvas de tensão x deformação do painço com 12% de umidade

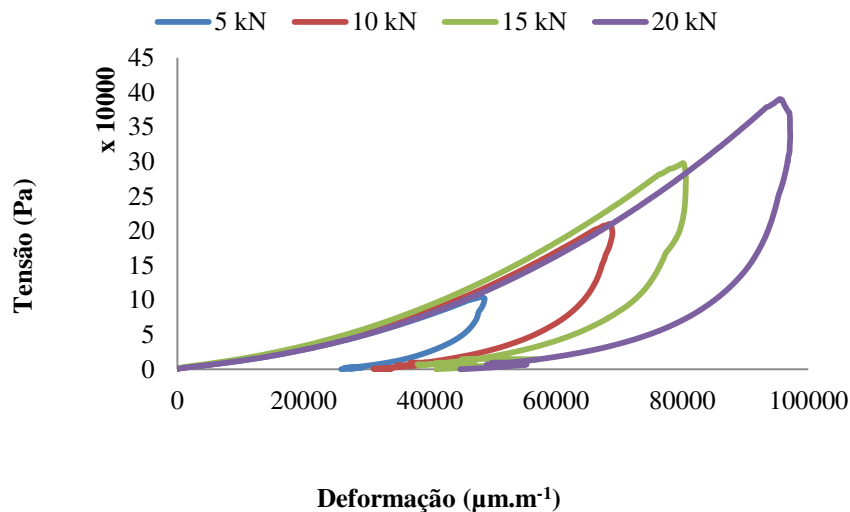


Figura 58 - Curvas de tensão x deformação do painço com 14% de umidade

Observa-se, nas Figuras 56 e 58, o mesmo comportamento das curvas de tensão versus deformação, com ocorrência da sobreposição nas curvas de 5, 10 e 20 kN e o seu afastamento da curva de 15 kN.

7.9.5.2.2 - Coeficiente de Poisson dos grãos de painço

O coeficiente de Poisson dos grãos de painço para a etapa de carregamento (ν^*) e de descarregamento (ν) das cargas de compressão (5, 10, 15 e 20 kN) e dos teores de umidade (10, 12 e 14% b.u.) se encontram na Tabela 18.

Tabela 18 - Coeficiente de Poisson nas fases de Carregamento e Descarregamento dos grãos de painço

Produto	Teor de Umidade (%- b.u.)	Parâmetros	Cargas de Compressão			
			5 (kN)	10 (kN)	15 (kN)	20 (kN)
Painço	10	v*	0,935	0,931	0,932	0,928
		v	1,240	0,868	0,793	0,543
	12	v*	0,971	0,924	0,924	0,704
		v	0,833	0,820	0,654	0,621
	14	v*	0,935	0,932	0,929	0,928
		v	0,8703	1,133	0,744	0,727

Legenda: (v*) –Coeficiente de Poisson no carregamento – adimensional
(v) –Coeficiente de Poisson no descarregamento - adimensional

Analisando a Tabela 14 observa-se que no carregamento os valores obtidos foram bastante semelhantes para todas as cargas.

Para o teor de 10% (b.u.) o coeficiente Poisson no carregamento (v*) apresentou comportamento linear, com baixa variação entre as cargas; já para o coeficiente de Poisson no descarregamento (v), constatou-se, com o aumento das cargas e do teor de umidade, decréscimo no seu valor.

Para o teor de umidade de 12% o coeficiente Poisson no carregamento (v*) apresentou o maior valor na carga de 5kN e o menor valor em 20kN; observou-se que, de modo geral com o aumento das cargas e do teor de umidade na etapa de descarregamento, ocorreu decréscimo no coeficiente de Poisson descarregamento (v); já para o teor de 14% (b.u.) coeficiente Poisson no carregamento (v*), apresentou comportamento linear mas para o coeficiente de Poisson no descarregamento (v), observou-se que, com um aumento na carga de 10kN, depois ocorreu decréscimo para as cargas de 5, 15 e 20 kN.

Stasiak (2003) encontrou, em seus estudos com grãos de centeio com 12,0% de umidade, valor máximo de 0,16, enquanto para o milho no teor de umidade de 12% o maior valor foi de 0,88 na carga de 10kN e o menor foi 0,52 na carga de 5kN, respectivamente.

7.9.5.2.3- Módulo de elasticidade calculado (E) dos grãos de painço

Na Figura 59 se encontramos resultados obtidos para o módulo de elasticidade calculado (E) para o painço, com as cargas de (5, 10, 15 e 20kN) e os teores de umidade (10,12 e 14%) respectivamente.

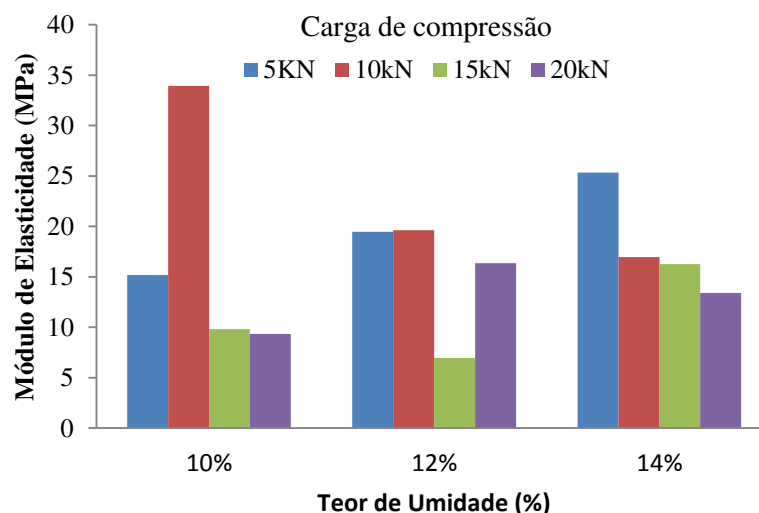


Figura 59: Módulo de Elasticidade Calculado para o painço

No teor de umidade de 10% (b.u.) o módulo elasticidade calculado (E) apresentou os seguintes resultados: o maior valor obtido foi na carga de 10kN igual a 33,93 MPa e o menor valor de 9,33 MPa para a carga de 20kN; observa-se um decréscimo para as cargas de 15 e 20kN.

Para o teor de umidade de 12%, o módulo de elasticidade calculado (E) na carga de 5 e 10kN apresentou valores semelhantes, o maior valor foi 19,64MPa na carga 10kN e o menor foi 19,46 Mpa na carga 5kN, com diminuição na carga de 15kN, respectivamente.

O teor de umidade de 14% (b.u.) apresentou os seguintes resultados para o módulo de elasticidade calculado (E), o maior valor obtido foi na carga de 5kN igual a 25,34 MPa e o menor valor de 13,40 MPa para a carga de 20kN.

7.9.5.2.4- Módulo de elasticidade experimental (E_{exp.}) dos grãos de painço

Na Figura 60 observa-se que os resultados obtidos para o módulo de elasticidade experimental (E_{exp.})

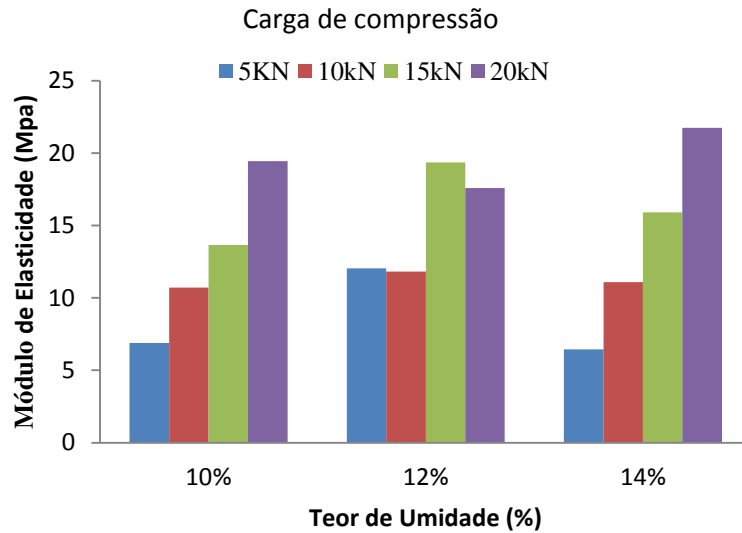


Figura 60: Módulo de Elasticidade Experimental para os grãos de painço

Analisando os dados para o teor de umidade de 10%, observa-se que no módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$), esses dados aumentaram com o acréscimo da cargas, o valor máximo de 19,44 MPa foi na carga de 20kN e o menor foi de 6,88 MPa para a carga de 5kN.

Para o teor de umidade de 12% (b.u.) constatou-se que os dados do módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$) apresentaram oscilação nos resultados, apesar do maior (19,35 MPa), e do menor (11,82 MPa), valores encontrados serem atribuídos à carga de 15 e 10 kN, respectivamente.

Para os resultados dos módulos de elasticidade experimental($E_{exp.}$), observou-se no teor de umidade de 14%, que com o aumento das cargas ocorreu aumento nos módulos, em que o maior valor foi de 21,75 na carga de 20kN e o menor foi 6,45 para 5kN. módulo de elasticidade experimental.

Molenda e Stasiak (2002) obtiveram, pesquisando o comportamento das propriedades elásticas com aplicação de carga uniaxial de 100 kPa, para cinco tipos de grãos (cevada, aveia, trigo, centeio e canola), os seguintes resultados do módulo de elasticidade (E), o valor máximo de 23,6MPa para os grãos de centeio, no teor de umidade de 10% e o menor, foi 6,6MPa no teor de 15% para os grãos de canola; analisando o painço, percebe-se, para o módulo de elasticidade calculado (E), que o maior valor foi 130,25MPa e o menor 13,95MPa no teor de umidade de 12%, para o módulo de elasticidade experimental (E_{exp.}) o maior valor foi 47,43MPa, no teor de umidade de 10% e o menor 26,94MPa no teor de umidade de 14%.

7.9.5.2.5 Ângulo de dilatação do painço

Na Figura 61, conclui-se, com base nos dados obtidos dos ângulos de dilatação para o painço, os quais apresentaram tendência semelhante até a carga de 15 kN para todos os teores de umidade.

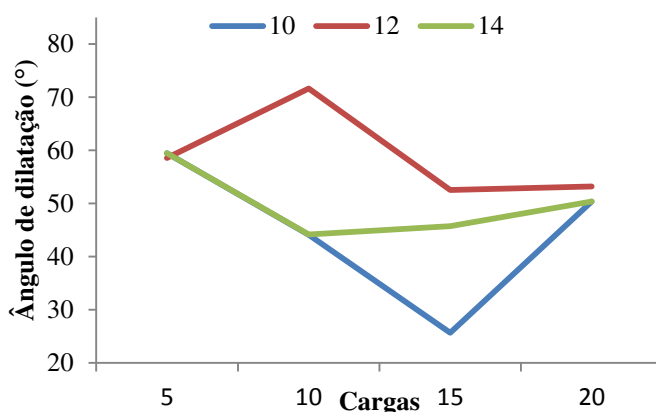


Figura 61. Ângulo de dilatação dos grãos do painço

No teor de umidade de 10% (b.u.) o maior ângulo foi de 59,46° na carga de 5kN e o menor de 25,65° na carga de 15 kN; para o teor de umidade de 12% o menor foi 19,84° na carga de 10kN e o maior de 24,82° para 15kN e no teor de 14% o maior valor do ângulo foi de 39,22° na carga de 5kN e 29,75° foi o menor ângulo na carga de 15kN.

Para o teor de umidade de 12% (b.u.), os ângulos de dilatação (ψ) apresentaram tendência de queda com o maior valor (71,67°) a 10kN e o menor valor (52,55°) a 10 kN. Comparando o teor de umidade de 10 com 12% (b.u.), o maior valor do ângulo de dilatação (ψ) foi 71,67° na carga de 10kN em 12% de umidade e o menor foi 25,65° na

carga 15kN no teor de umidade de 10%; observa-se que na carga de 15kN no teor de 12%, uma redução do ângulo e na carga de 20kN ocorreu um aumento.

Outra observação no teor de umidade de 14% que apresentou diminuição do ângulo de dilatação (ψ) na carga de 10 e 15kN cujo maior valor foi de $59,46^\circ$ para carga de 5kN e o menor de $44,155^\circ$ na carga de 10kN, depois ocorreu aumento para as cargas de 15 e 20 kN, cujo ângulos foram $45,72$ e $50,35^\circ$, respectivamente.

Observou-se que na Figura 61, ocorreu uma sobreposição nas curvas de 10 e 14% de umidade, o que pode ser justificado, por contada forma dos grãos, do teor de umidade, do tamanho do grão e do atrito do grão que varia com o teor de umidade.

7.9.5.3 Soja

7.9.5.3.1 Curvas de tensão x deformação para grãos de soja

As Figuras 62, 63 e 64 ilustram as curvas plotadas com os valores médios de tensão (σ_y) versus deformação (ϵ_y) dos ensaios mecânicos visando aos grãos de soja para os quatro níveis de carga e para os respectivos teores de umidade de 10, 12 e 14% (b.u.).

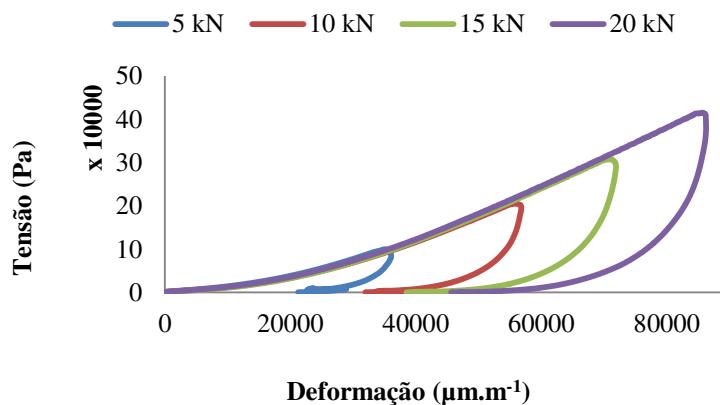


Figura 62 - Curvas de tensão x deformação dos grãos de soja, com 10% de umidade

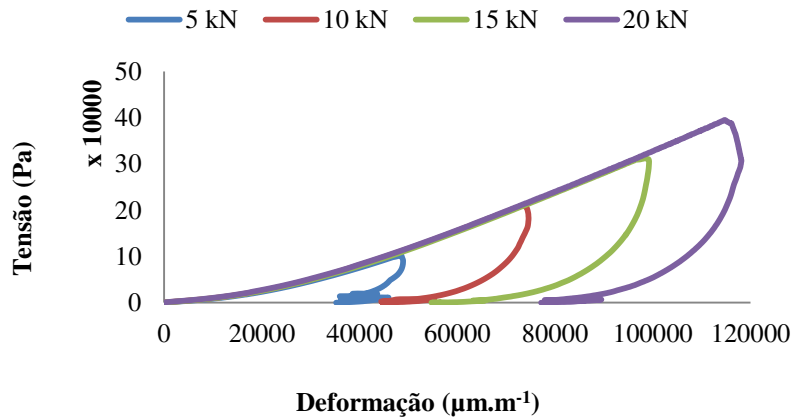


Figura 63 - Curvas de tensão x deformação dos grãos de soja, com 12% de umidade

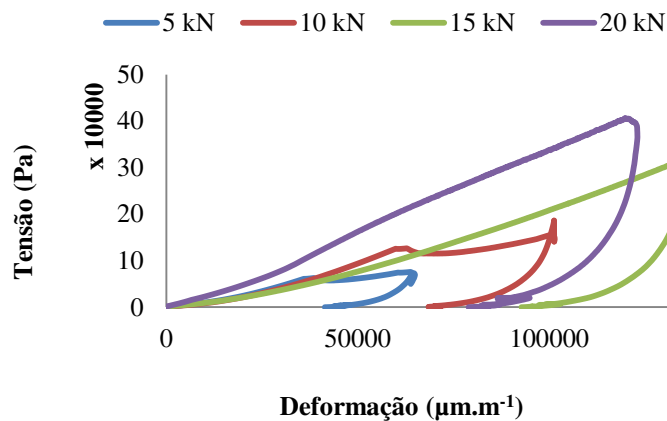


Figura 64- Curvas de tensão x deformação dos grãos de soja, com 14% de umidade

Observou-se, nas Figuras 62 e 63, que a representação das curvas obtidas no ensaio de compressão apresenta sobreposições na primeira etapa do ensaio que caracteriza o carregamento; as curvas tiveram comportamento similar na primeira etapa, indicando seus picos quando aplicadas novas cargas.

Analisando a Figura 64 observa-se sobreposição no início do carregamento nas curvas de 5, 10 e 15kN; outra observação feita a esta figura é um distanciamento no comportamento das curvas de tensão versus deformação na carga de 10 e 20kN, sinalizando irregularidade no decorrer do ensaio.

7.9.5.3.2- Coeficiente de Poisson dos grãos de soja

Os resultados obtidos para o coeficiente de Poisson dos grãos de soja para a etapa de carregamento (v^*) e de descarregamento (v) para quatro cargas de compressão (5, 10, 15 e 20kN) e os teores de umidade (10, 12 e 14% b.u.) se encontram na Tabela 19.

Tabela 19 - Coeficiente de Poisson nas fases de Carregamento e Descarregamento dos grãos de soja

Produto	Teor de Umidade (% - b.u.)	Parâmetros	Cargas de Compressão			
			5 (kN)	10 (kN)	15 (kN)	20 (kN)
Soja	10	v^*	0,86	0,88	0,93	0,92
		v	1,14	0,85	0,79	0,82
	12	v^*	0,88	0,96	0,91	0,93
		v	0,68	0,86	0,85	0,82
	14	v^*	0,91	0,92	0,92	0,86
		v	18,4	2,5	4,0	5,2

Legenda: (v^*) –Coeficiente de Poisson no carregamento – adimensional
 (v) –Coeficiente de Poisson no descarregamento – adimensional

Quanto ao teor de umidade de 10% (b.u) seu comportamento foi linear; com aumento das cargas ocorreu aumento do seu valor no coeficiente de Poisson no carregamento (v^*); para o descarregamento observou-se, com o aumento das cargas e do teor de umidade, um decréscimo cujo maior valor de 1,14 foi na carga 5kN e o menor 0,79, na carga de 15 kN; para o teor de umidade de 12% ocorreu aumento no coeficiente de Poisson no carregamento (v^*)nas cargas de 10 e 20kN e nas cargas de 5 e 15kN ocorreu diminuição do seu valor; observou-se, ainda, com o aumento das cargas e do teor de umidade na etapa de descarregamento, um decréscimo do Poisson nas cargas de 5 e 20 kN, enquanto para o teor de 14% (b.u.) o coeficiente Poisson no carregamento (v^*), apresentou comportamento linear, em que o maior valor foi na carga 5kN e o menor na carga de 20 kN; em relação ao coeficiente de Poisson observou-se, no

descarregamento (v), aumento na carga de 5kN e decréscimo nas cargas de 10, 15 e 20 kN.

Stasiak (2003) encontrou, em seus estudos com os grãos de canola com 12,0% de umidade, valor máximo de 0,16 enquanto para a soja no teor de umidade de 12% o maior valor foi de 0,82 na carga de 20kN e o menor foi 0,68 na carga de 5kN; em referencia aos grãos de centeio com 10,0% de umidade, no estudo de Stasiak (2003), o valor máximo encontrado foi de 0,19, e para a soja no teor de umidade de 10% o maior valor foi de 1,14 e o menor foi 0,79, ambos para a carga de 20kN.

7.9.5.3.3 Módulo de elasticidade calculado (E) para os grãos de soja

Na Figura 65 observam-se os resultados obtidos para o módulo de elasticidade calculado (E) para grãos de soja nas cargas de (5, 10, 15 e 20kN) e nos teores de umidade (10,12 e 14) respectivamente.

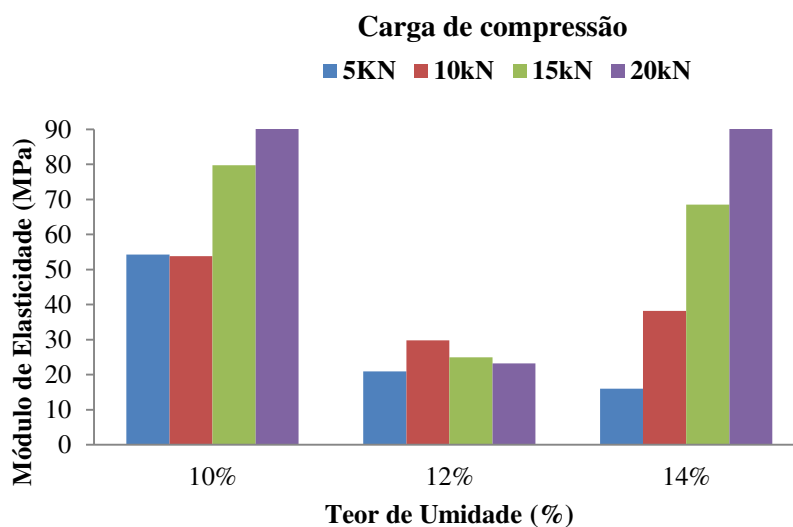


Figura 65 - Módulo de Elasticidade Calculado de grãos de soja

Analisando os resultados na Figura 66 entende-se que, com o aumento das cargas ocorreu aumento do módulo elasticidade calculado (E) da soja com 10% de umidade, cujas nas cargas de 15 e 20kN obtiveram os maiores valores; observa-se também que nas cargas de 5 e 10kN os resultados obtidos foram semelhantes, o maior foi 110,47MPa e o menor de 53,82MPa.

Para o teor de umidade de 12% com o módulo elasticidade calculado (E) ocorreu diminuição em relação aos teores de umidade de 10 e 14%. Observando-se que o maior

valor obtido foi de 29,76MPa na carga de 10kN e o menor 20,91MPa na carga de 5kN; ocorreu, também, variação nas cargas 15 e 20kN enquanto os valores na carga de 5kN foram menores que os obtidos nas demais cargas; enfim, o teor de umidade de 14% (b.u.) apresentou os seguintes resultados para o módulo de elasticidade calculado (E): o menor valor na carga de 5kN de 53,82 MPa e o maior valor de 110,47 MPa para a carga de 20kN.

7.9.5.3.4 Módulo de elasticidade experimental ($E_{exp.}$) para grãos de soja

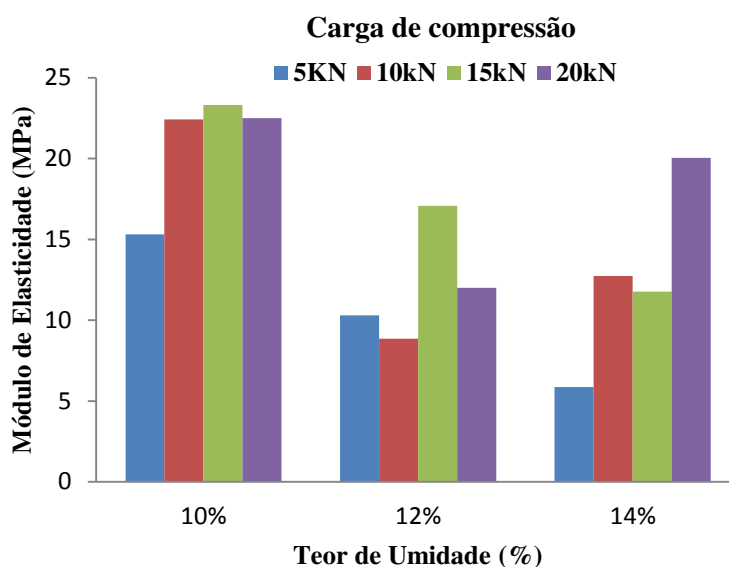


Figura 66 - Módulo de Elasticidade Experimental de grãos de soja

Os resultados obtidos na Figura 69 ressaltam que com o aumento das cargas ocorreu aumento no módulo de elasticidade experimental($E_{exp.}$) da soja em que com o teor de umidade de 10% se obtiveram os seguintes resultados: o maior valor de 23,31 MPa para na carga de 15kN e o menor foi de 15,3 MPa para a carga de 5kN; para o teor de umidade de 12%, foram obtidos, nas cargas de 15 kN, os seguintes resultados: maior valor de 17,07 MPa na carga de 15kN e menor de 8,85 MPa na carga de 10kN.

Nos resultados dos módulos de elasticidade experimental($E_{exp.}$), para o teor de umidade de 14% observou-se que, com o aumento das cargas, ocorreu aumento dos módulos de elasticidade experimental($E_{exp.}$), cujo maior valor foi de 20,04MPa na carga de 20kN e o menor, de 5,87 MPa na carga de 5kN.

7.9.5.3.5 Ângulo de dilatação dos grãos de soja (ψ)

A Figura 67 os ângulos de dilatação para os grãos de soja apresentaram tendência semelhante até a carga de 15 kN, para todos os teores de umidade.

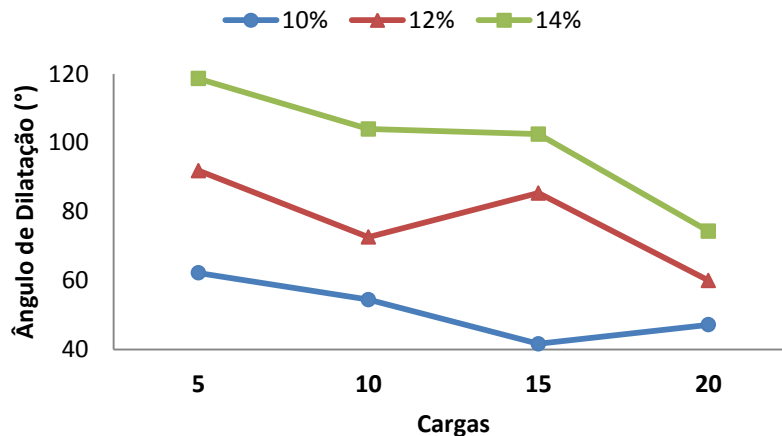


Figura 67. Ângulo de dilatação dos grãos de soja

No teor de umidade de 10% (b.u.) o maior ângulo foi de 62,21° na carga de 5kN e o menor de 41,64° na de 15 kN; para o teor de umidade de 12% o menor ângulo foi 60,0° na carga de 20kN e o maior foi de 91,93° para 5kN; para o teor de 14% o maior valor do ângulo foi de 118,64° na carga de 5kN e 74,36° foi o menor ângulo na carga de 20kN.

Para o teor de umidade de 12% (b.u.), os ângulos de dilatação (ψ) apresentaram tendência de queda com o maior valor 91,93° a 15 kN e o menor valor 60,01° na carga de 20 kN. Comparando o teor de umidade de 10% com 12% (b.u.), conclui-se que o maior valor ângulo de dilatação (ψ) foi 91,93° na carga de 5kN e no teor de 12% e o menor foi 41,64° na carga 15kN e teor de 10%. Observa-se uma variação do ângulo encontrado no teor de umidade de 12% com o aumento da carga; já para o teor de umidade de 14%, foi apresentada uma diminuição do ângulo de dilatação (ψ) com o aumento da carga, cujo maior valor foi de 118,64°, para a carga de 5kN e para o menor valor obtido de 74,36° referente à carga de 20kN.

7.9.5.3.6 Conclusões

- As curvas características do ensaio da compressão para os produtos granulares apresentaram, em todos os teores de umidade, comportamento similar para o modelo teórico;
- O teor de umidade influenciou diretamente no valor do módulo de elasticidade, no coeficiente de Poisson no carregamento (ν^*) e descarregamento (ν) apresentando aumento com o acréscimo das cargas;
- O coeficiente calculado no descarregamento apresentou os maiores valores para todos os teores de umidade e grãos analisados;
- O módulo de elasticidade calculado (E) e o módulo de elasticidade experimental (E_{exp}) apresentaram aumento dos resultados com o acréscimo das cargas sendo os maiores valores atribuídos ao módulo de elasticidade experimental (E_{exp}).
- Dentre os grãos ensaiados neste trabalho, os maiores valores do módulo de elasticidade calculado (E) e Experimental foram para os grãos de milho nos teores de umidade de 10 e 12%.

8. 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.

AOKI, R. Stresses of powders and granular materials in bins and hoppers. **Theory and Applied Mechanics**, v. 26, p. 9-24, 1978.

AS 3774.AUSTRALIAN STANDARD. Loads on bulk containers. Sydney: 1996.

AYUGA, F. Los empujes del material almacenado en silos. **Informes de la construcción. Madrid**, v. 46, n. 436, p. 27-33, 1995.

BARRÊTO, R.L. **Determinação das propriedades físicas do colorau e dos grãos de urucum (*Bixa orellana L.*) para elaboração de projetos de pressões e fluxo em silos.** 1997. 84p. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambiente), UFPB, Campina Grande, 1997.

BATISTA, C. da 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, 2009. 102 p

BENINK, E.J. **Flow and stress analysis of cohesionless bulk materials in silos related to codes.** 162p. Thesis – Universiteit Twente, Netherlands, 1989.

BEVERLOO, W. A.; LENIGER, H. A.; and DE VELDE, J. V. The flow of granular solids through orifices. **Chemical Engineering Science**, v.15, p. 260 -269, 1961.

BISCHARA, A.G.; AYOUB, S. F.; MAHDY, A. S. Static pressure in concrete circular silos storing granular materials. **ACI Structural Journal**, Detroit, n. 80-21, p. 210-216, Maio/Jun., 1983.

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

BRASIL. **Regras para Análise de Sementes.**Ministério da Agricultura e da Reforma Agrária, 1992, 365 p.

BLIGHT, G. E. A comparison of measured pressures in silos with code recommendations. **Bulk solids Handling**. V.8, n.2, p. 145-153, 1988.

BROWN, C. J., LAHLOUH, E. H., ROTTER, J. M. **Experiments on a square planform steel silo.** **Chemical Engineering Science**, Elsevier Science, n. 55, p. 4399-4413, 2000.

BROWN, C. J.; NIELSEN, J. **Silos: fundamentals of theory, behaviour and design.** London: E e FN SPON, 1998. 836p.

CALIL JÚNIOR, C. et al. **Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo.** São Carlos, EESC. 232p. 2007.

CALIL JÚNIOR, C. **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais.** São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1990. 200p. (Apostila).

CALIL JÚNIOR, C. **Sobresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos.** 1984. 184p. Tese Doutorado. Universidad Politécnica de Barcelona, Barcelona, 1984.

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

CARSON, J. W. e JENKYN, R. T. Load development and structural considerations in silo design. In: **Reliable Flow of Particulate Solids II**, Oslo, Norway, August 1993.

CASARIL, J. ; PATRICIO, R. M.; OLIVEIRA, L. C. DE ; WILNER, P. B. ; HASING, F. M. L.; ELIAS, M. C.. **Efeitos do Percentual de Grãos Quebrados sobre Propriedades Físicas de interesse no Armazenamento de grãos de soja** .XIV Encontro de Pós-graduação UFPEL – Rio Grande do Sul –RS, 2012.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento - **Conab estima crescimento de até 9,3% na produção de grãos da safra 2012-2013.** Disponível em:<http://agenciabrasil.ebc.com.br/noticia/2012-11-08/conab-estima-crescimento-de-ate-93-na-producao-de-graos-da-safra-2012-2013>, Acesso em: 04/05/13

CHEUNG, A. B. **Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos.** Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. São Carlos. 252 p. (2007).

CHOI, J.; KUDROLLI, A. e BAZANT, M. Z. Velocity profile of granular flows inside silos and hoppers. *Journal of Physics Condensed Matter*, n. 17, p. 2533-2548, 2005.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Produção de grãos no Brasil. 2013**

DIN. Lastnahmen für bauten- en lasten in silozellen (Design loads for buildings- Loads in silos). Deutsche, 1987. (DIN 1055, Part 6)

EUROCODE 1 PART 4. **Actions on silos and tanks.** Bruxelas: 1995.

EUROCODE 1, 1996. **Basis of design and actions on structures** – Part 4: Actions in silos and tanks. European Committee for Standardization, Brussels.

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

FREITAS, E. G. A. **Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano**. São Carlos: USP, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001.

FREITAS, E. G. A.; CALIL JR. C. **Estudo Teórico e Experimental das Pressões em Silos Cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, v.7, n.24, p. 1-34. 2005

GAYLORD, E. H.; GAYLORD, C. N. **Design of steel bins for storage of bulk solids**. New Jersey: Prentice-Hall, 359p. 1984.

GOMES, F. C. **Estudo teórico e experimental das ações em silos horizontais**. São Carlos: USP, 2000. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

GRIFFITHS, T. J.; Ghanizadeh, A. - "**Determination of Elastic Constants for Porous Sintered Iron Powder Compacts**" - Powder Metallurgy, v. 29, n. 2, p. 129-133, 1986.

HEZEL, C. R.; **Avaliação da pressões em silos verticais conforme diferentes normas internacionais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – UNIOESTE, Cascavel, 2007, p.161

HIRSHFELD, D e RAPAPORT, D. C. Granular flow from a silo: discrete-particle simulations in three dimensions. **The European Physical Journal**, n. 4, p. 193-199, 2001.

HORABIK J., MOLENDAM M., 2000. **Device for determination of pressure ratio of granular materials**. Patent Application No. P-340014, Bulletin of Patent Office N°. 22(700), A1(21) 340017. (in Polish) *Interferometry in Industry*" - Fringe'97, s. 5, p. 520-523, 1997

INTERNATIONAL STANDART. ISO 11697. **Bases for design of structures: loads due to bulk materials**. Switzerland: 1995.

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

JENIKE, A. W. **Storage and flow of silos**. Salt Lake City. University of Utah. Bulletin 123. Engineering Experiment Station (1964).

JENIKE, A.W., JOHANSON, J.R. and CARSON, J.W. "**Bin Loads – Part 2: Concepts**", **Journal of Eng. For Industry**, Trans. ASME, Series B, 95(1) 1973.

JULIANO, P.; MUHUNTHAN, B.; CÁNOVAS, G.V.B. Flow and shear descriptors of preconsolidated food powders. **Journal of Food Engineering**, Kidlington, v.72, n.2, p.157-166, 2006.

KNOWTON, T. M.; CARSON, J. W.; KLINZING et al. The importance of storage, transfer and collection. **Chemical Engineering Progress**, Elsevier Science, n.90, p.44-54, 1994.

KALINOVA, J.; MOUDRY, J. Content and quality of protein in proso millet (*Panicummiliaceum*L.) varieties. **Plant Foods for Human Nutrition**, Dordrecht, v. 61, n. 1, p. 45-49, 2006.

KARAM, D.; WESTRA, P.; NISSEN, S. J.; WARD, S. M.; FIGUEIREDO, J. E. F. Genetic diversity among proso millet (*Panicummiliaceum*) biotypes assessed by aflp technique. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 167-174, 2004.

KASHANINEJAD, M.; AHMADI, M.; DARAEI, A.; CHABRA, D. Handling and frictional characteristics of soybean as a function of moisture content and variety. **Powder Technology**, v.188, p. 1-8, 2008.

KOBAYASHI, A. S. - "**Handbook on Experimental Mechanics**" - Prentice-Hall, USA, 2nd

LIMA, E. V.; CAVARIANI, C.; LIMA, P. L.; CRUSCIOL, C. A. C.; NAKAGAWA, J.; VILLAS BOAS, R. L. Qualidade fisiológica de sementes de painço (*Panicum dichotomiflorum* Michx.) em função do tempo de mistura com o superfosfato triplo. **Cultura Agrônômica**, Ilha Solteira, v. 9, n. 1, p. 177-189, 2000.

LOHNES R. A. Lateral stress ratios for particulate materials. **Powder Handling e Processing**. v. 5, n. 4, p 331-336, 1993.

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 Agrotecnologia, Lavras, v.31, n.3, p. 851-859, 2007.

LOPES NETO, J. P.; **Análise experimental das forças de atrito em silos cilíndricos verticais** .167p. Tese (Doutorado). UFCG, Campina Grande - 2009.

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

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, p.339-345, 2013.

LU, H.; ZHANGA, J.; LIUB, K. B.; WUA, N.; LIC, Y.; ZHOUA, K.; YED, M.; ZHANGE, T.; ZHANGE, H.; YANGF, X.; SHENE, L.; XUA, D.; LIA, Q. Earliest domestication of common millet (*Panicummiliaceum*) in East Asia extended to 10,000 years ago. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v.106, n. 18, p. 7367-7372, 2009.

LUEPTOW, R. M.; AKONUR, A; SHINBOT A. PIV for granular flows. **Experiments in fluids**, n. 28, p. 183-186, 2000.

MADRONA, F. S. **Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). EESC/ USP, São Carlos, 2008. 178 f

MARTINS; G. C. A. **Estudo teórico e experimental de esforços devidos a cabos de termometria fixados em estruturas de coberturas de silos cilíndricos para armazenamento de grãos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). EESC/ USP, São Carlos. 2012. 98 f

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

MOLEND, M.; HORABIK, J.; THOMPSON, S. A. and ROSS, I. J. **Bin loads induced by eccentric filling and discharge of grain**. *American Society of Agricultural Engineers*, n. 3, p. 781-785, 2002.

NASCIMENTO J. W. B.; CALIL JÚNIOR, C. **Painéis estruturais para paredes de silos verticais prismáticos**. Caderno de Engenharia da Estruturas, São Carlos, n.6, p.1-21, 1998.

NASCIMENTO, J. W. B. **Estudo de pressões em silos verticais metálicos com diferentes relações altura/diâmetro**. Relatório técnico. CNPq - Processo: 201051/2005-2 – CNPq – 2007.

NASCIMENTO, J. W. B. **Estudos de silos metálicos prismáticos para fábricas de ração**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.222 p.

OSTENDORF, M. E SCHWEDES, J. Application of particle image velocimetry for velocity measurements during silo discharge. **Powder Technology**, n. 158, p. 69-75, 2005.

PALMA, G. **Pressões e fluxos em silos esbeltos ($h/d \geq 1,5$)**. Dissertação Mestrado em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005. 121p

PALMA, G.; CALIL JUNIOR C. **Pressões e fluxo em silos esbeltos ($H/D \geq 1,5$)**. **Cadernos de Engenharia de Estruturas projeto e exemplos de cálculo**. São Carlos: EESC. São Carlos, v. 10, n. 42, p. 129-150, 2008

PN-89/B-03262, Polish Standard. Concrete bins for storing granular materials and silage. Design rules.(in Polish) 1989.**Powder Technology**, v.188, p. 1-8, 2008

PUZZI, D. **Abastecimento e armazenamento de grãos**. Campinas: ICEA, 2000.

RANKINE, W. J. M. e KOENEN, M. Calculation of side and floor pressure in silo walls.**Zentralblatt der bauverwalyung**, p. 446-449, 1895.

RAVENET, J. **Silos**. Barcelona: Editores Técnicos Associados, 508 p., 1992.

RAVENET, J. **Silos. Flujo de vaciado de solidos. Formacion de bovedas. Efectos.** Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 335 p., 1983.

RAVENET, J. **Silos. Flujo de vaciado de solidos. Formacion de bovedas. Efectos.** Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 335 p., 1983. Related to codes. 1989. 162p. Thesis – Universite it Tweste, Netherlands, 1989.

R I B E I R O . D . M . , C O R R Ê A , P . C .
F U R T A D O . B . F . , G O N E L I . A . L . D . ,
R E S E N D E , O . **Propriedades mecânicas dos grãos de soja em função do teor de água** Revista de Engenharia Agrícola. Jaboticabal, v.27, n.2, p.493-500, maio/ago. 2007

RESENDE; O. **Propriedades mecânicas dos grãos de soja em função do teor de água.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.27, n.2, p.493-500, 2007

ROBERTS, A. W. **Storage, flow and handling of bulk solids.** Newcastle: Department of Mechanical Engineering, University of Newcastle, 1987. 612p.

ROTTER, J. M. **Guide for the economic design of circular metal silos.** London: Spon Press, 28p. 2001.

SAFARIAN, S. S. e HARRIS, E. C. **Design and construction of silos and bunkers.** VanNostrand Reinhold Company Inc. New York, 468p. 1985. São Carlos, 2005. 121p.

SAWICKI A. **Elasto-plastic interpretation of oedometric test.** Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, 41 (1–2): 111–131. 1994.

SAWICKI A., ŚWIDZIŃSKI W. **Elastic Module of Particulate Materials.** Powder Technology, 96: 24–32. 1998.

SCHEREIBER, E.; ANDERSON, O. L.; SOGA, N. - **Elastic Constants and Their Measurement** -Sons, USA, 4th edition, 1997.

SCHWEDES, J. **Measurement of flow properties of bulk solids,** In: Proc. Int. Symp. Powder Technology, Kyoto (Japan), p. 89-98, 1981.

SNBATI. Reglas para proyecto y calculo de silos de hormigón. **Sindicato Nacinal del Hormigón Armado y Técnicas Industrializadas.** França: 1975.

SILVA, M. C. A. T., **Estudo da Variabilidade de Pressões em silos.** Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) EESC/USP. São Carlos, 1993

SILVA, F. S. et. al. C. Efeito do Beneficiamento nas Propriedades Físicas e Mecânicas dos Grãos de arroz de distintas variedades. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.5, n.1, p.33-41, 2003

STASIAK.M.; **Determination of elastic parameters of grain with oedometric and acoustic methods.** Researchin Agricultural Engineering., 49, 2003 (2): 56–60

STEINGART, D. 3 EVANS, J. W. Measurements of granular flows in two-dimensional hoppers by particle image velocimetry. Part I: experimental method and results. **Chemical Engineering Science**, n. 60, p. 1043-1051, 2005.

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

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

WALKER, D. M. An approximate theory for pressures and arching in hoppers. **Chemical Engineering Science**, v. 21, p. 975-997, 1966.

WALTERS, J.K. **A theoretical analysis of stresses in axially-symmetric hoppers and bunkers**, **Chemical Engineering Science** 28, 779, 1973.

ZANCANELLA, E. F.; BONATTI, J. L.; MARTUCCÍ, L. M. V. **Cultura do painço: informações práticas**. Campinas: CATI, 2006. 4p. (Folheto).

ZHANG Q., PURI V.M., MANBECK H.B., WANG M.C., 1988. **Elastoplastic constitutive parameters of en masse wheat for a cyclic load model**. Trans. ASAE, (31) 3: 910–916.