



Propriedades mecânicas e de fluxo de produtos agroindustriais

Carlos A. da Costa¹, José P. Lopes Neto², José W. B. do Nascimento³,
Marineide J. Diniz⁴ & Valneide R. da Silva⁵

¹ UAEA/UFCEG. Campina Grande, PB. E-mail: carcost@gmail.com

² UAEA/UFCEG. Campina Grande, PB. E-mail: lopesneto@deag.ufcg.edu.br (Autor correspondente)

³ UAEA/UFCEG. Campina Grande, PB. E-mail: wallace@deag.ufcg.edu.br

⁴ DCAT/UFERSA. Mossoró, RN. E-mail: marineide@ufersa.edu.br

⁵ UAEA/UFCEG. Campina Grande, PB. E-mail: rval707@yahoo.com.br

Palavras-chave:

silos
módulo de elasticidade
coeficiente de Poisson
compressão

RESUMO

No cálculo de estruturas de silos vem-se utilizando, ao longo dos tempos, novas ferramentas e métodos visando à determinação das características dos produtos armazenáveis. Objetivou-se, com a pesquisa, determinar as propriedades mecânicas e de fluxo de produtos granulares como grãos de arroz e milho triturado, com teores de umidade de 10, 12 e 14% e de farinha de mandioca, produto este considerado pulverulento com teores de umidade de 10 e 12%. Para a determinação das propriedades mecânicas foram realizados ensaios de compressão em célula especialmente confeccionada para esta finalidade. Foram utilizadas quatro cargas de compressão (5, 10, 15 e 20 kN). Os ensaios de propriedades de fluxo foram realizados utilizando-se equipamento de cisalhamento translacional conjugado com célula de cisalhamento denominada Jenike Shear Cell. Todos os ensaios foram realizados no período de julho a setembro do ano de 2012. Pode-se afirmar que os resultados satisfizeram o preconizado pela metodologia de tipo de fluxo e as adotadas pelas normas internacionais; os valores médios das propriedades mecânicas foram consistentes aos encontrados na literatura.

Key words:

silos
modulus of elasticity
Poisson coefficient
compression

Mechanical and flow properties of agroindustrial products

ABSTRACT

In the calculation of structures of silos comes up, over time, the use of new tools and methods aiming to determine the characteristics of storable products. The objective of this study was to determine the mechanical and flow properties of granular products such as grains of rice and ground corn at moisture contents of 10, 12 and 14% and cassava flour properties, which is considered as a powder with levels of humidity of 10 to 12%. For the determination of mechanical properties, compression tests were performed on cell specially made for this purpose. Four compression loads (5, 10, 15 and 20 kN) were used. The flow properties tests were conducted using translational shear equipment combined with Jenike Shear Cell. All assays were performed during the period from July to September, 2012. It may be stated that the results meet the criteria of the methodology flow pattern and those adopted by international standards; the average values of the mechanical properties were consistent to the ones found in the literature.

INTRODUÇÃO

Atualmente, com a expansão da agricultura e de outros setores da economia, os silos se tornaram estruturas fundamentais à economia de espaço físico, mão-de-obra, conservação do produto e, sobretudo, exercem a função de regulador de estoques e preços.

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

Jenike (1964) recomendou a utilização do índice de fluabilidade (ff_c) como uma estimativa para identificação do comportamento do produto durante o descarregamento do silo, determinado pela razão entre a tensão principal de consolidação, σ_{MP} , e a tensão não confinada de deslizamento, f_c . Classifica-se como fluxo do tipo livre aquele produto cujo valor de ff_c for superior a 10, como fluxo do tipo fácil cujo ff_c varia entre 4 e 10, do tipo coesivo com ff_c variando de 2 a 4, muito coesivo de 1 a 2 e sem fluxo cujo valor de ff_c for inferior a 1.

Madrona (2008) assegura que a determinação da relação entre pressões horizontais e verticais no produto armazenado, fator K, é um dos maiores entraves em projetos de silos; seu valor influencia significativamente no regime de pressões na construção.

Ramírez et al. (2010) asseguram que dados sobre as variáveis mecânicas, tais como o coeficiente de Poisson,

módulo de elasticidade e ângulo de dilatação de sólidos a granel ainda são insuficientes visto que os métodos clássicos não os desenvolvem em sua complexidade, mas afirmam que para se obter resultados viáveis e confiáveis pode-se utilizar os métodos numéricos.

Pesquisas realizadas por Molenda et al. (2006) com farelo de trigo, açúcar e trigo em dois laboratórios, um na Espanha e outro na Polônia, chegaram a resultados que apontam o aumento do módulo de elasticidade com aumento da tensão. Durante a fase de descarga os autores encontraram para o trigo, no laboratório espanhol, um valor máximo de 64,3 MPa para uma carga de 158 kPa enquanto na Polônia o módulo de elasticidade diminuiu de 22 para 11 MPa com o aumento no teor de umidade de 10 para 20%. Na Polônia o módulo de elasticidade de grãos de açúcar e farinha de trigo foi determinado como sendo 30,8 e 18,5 MPa, respectivamente, para uma carga de 100 kPa. Já na Espanha o valor determinado para grãos de açúcar e farinha de trigo foi de 65,6 e 17,1 MPa, respectivamente, para uma carga de 79,1 kPa.

Moya et al. (2002) encontraram para o coeficiente de Poisson para cevada, milho, aveia, girassol, lentilha e trigo, valores de 0,36; 0,31; 0,41; 0,33; 0,35 e 0,37, respectivamente, para uma carga de 100 kPa a qual faz referência à pressão normalmente alcançada em silos; já o coeficiente de Poisson do trigo obtido em um laboratório polonês apresentou valores de 0,19 a 0,22 em decorrência de uma variação do teor de umidade de 10 a 20%.

Na procura de informações que contribuam para os projetos de unidades de armazenamento, a presente pesquisa objetivou a determinação das propriedades mecânicas e de fluxo de três produtos agroindustriais (dois granulares e um pulverulento) para diferentes teores de umidade.

MATERIAL E MÉTODOS

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

Foram determinadas as propriedades de fluxo e mecânicas de três produtos armazenáveis sendo dois produtos granulares (arroz e milho triturado) com teores de umidade de 10, 12 e 14% base úmida (b.u.) e um pulverulento (farinha de mandioca) com teores de umidade de 10, 12% (b.u.).

Os ensaios de propriedades de fluxo foram realizados com emprego do equipamento de cisalhamento translacional conjugado com célula de cisalhamento denominada Jenike Shear Cell. Foram utilizadas as séries 100 N (70, 50 e 35 N), 70 N (50, 35 e 20 N) e 50 N (35, 20 e 10 N) como cargas de pré-cisalhamento e de cisalhamento; o ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) foi determinado pelo mesmo equipamento tendo apenas uma mudança na base de seu anel inferior por uma placa da amostra do material de parede (aço rugoso) sendo os níveis de cargas normais adotados de 50, 40, 30, 20, 10 e 4,4 N.

As propriedades mecânicas determinadas foram coeficiente de Poisson (ν), módulo de elasticidade (E) e o ângulo de dilatação (ψ). Os parâmetros de elasticidade e plasticidade foram determinados pela compressão dos grãos e pó em estudo, com base na metodologia proposta por Sawicki (1994). Para compressão dos produtos foram utilizadas cargas de compressão de 5, 10, 15 e 20 kN.

O procedimento consistiu de duas etapas: carregamento (OA) e descarregamento (AB e BC); o último se subdivide em outros dois estágios, o primeiro considerado retilíneo (AB) e o segundo curvilíneo (BC) como observado na Figura 1.

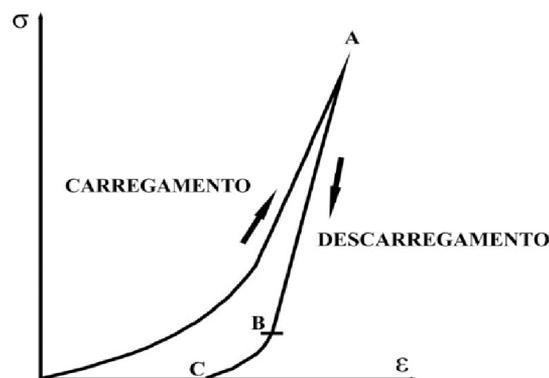


Figura 1. Diagrama de carga e descarga de silos

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

O fator K_0 , calculado na etapa de carregamento, expressa a relação entre a pressão horizontal, σ_x , e a vertical, σ_y , tendo, assim, dependência linear, como descrito pela Eq. 1.

$$\sigma_x = k_0 \sigma_y \quad (1)$$

em que:

- σ_x - pressão horizontal, N m⁻²
- σ_y - pressão vertical, N m⁻²
- k_0 - coeficiente de dependência linear, adimensional

Nesta etapa a deformação total, ϵ_y , é composta de deformação plástica, ϵ_y^p , e deformação elástica, ϵ_y^e (Eq. 2).

$$\epsilon_y = \epsilon_y^p + \epsilon_y^e \quad (2)$$

Sendo a deformação plástica, ϵ_y^p , expressa pela Eq. 3 e a deformação pela Eq. 4.

$$\epsilon_y^p = D_1 \ln \left(1 + D_2 (\sigma_y)^\alpha \right) \quad (3)$$

$$\epsilon_y^e = \frac{\sigma_y}{E} \left(1 - \frac{2\nu^*}{1-\nu^*} \right) \quad (4)$$

Reorganizando a Eq. 2, tem-se:

$$\varepsilon_y = D_1 \ln \left(1 + D_2 (\sigma_y)^\alpha \right) + \frac{\sigma_y}{E} \left(1 - \frac{2\nu^*}{1-\nu^*} \right) \quad (5)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right) \quad (12)$$

Sendo o coeficiente de Poisson para o carregamento encontrado pela Eq. 6,

$$\nu^* = \frac{k_0}{1 + k_0} \quad (6)$$

em que:

- ε_y - deformação total, mm mm⁻¹
- ε_y^p - deformação plástica, mm mm⁻¹
- ε_y^e - deformação elástica, mm mm⁻¹
- σ_y - tensão vertical, N m⁻²
- E - módulo de elasticidade, N m⁻²
- ν^* - coeficiente de Poisson referente à fase de carregamento, adimensional

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

α - parâmetros do modelo determinado experimentalmente, adimensional

A segunda etapa do ensaio (descarregamento) se divide nos estágios AB e BC; no primeiro estágio (AB) a fração linear (retilínea) do gráfico é caracterizada pela deformação elástica; neste estágio são extraídas as informações concernentes às constantes elásticas (módulo de elasticidade, E, e coeficiente de Poisson, ν); já o segundo estágio (BC) é caracterizado pela deformação elástica e plástica, simultaneamente (Eqs. 7 e 8). Considera-se que o material é reversível sendo regido pela lei de Hooke:

$$\varepsilon_x^e = \frac{1}{E} \left[(1-\nu)\sigma_x - \nu\sigma_y \right] \quad (7)$$

$$\varepsilon_y^e = \frac{1}{E} \left[\sigma_y - 2\nu\sigma_x \right] \quad (8)$$

Durante o primeiro estágio (AB) observa-se, na descarga, uma relação linear, característica de deformação elástica (Eq. 9).

$$\varepsilon_y = \varepsilon_y \quad (9)$$

Considera-se, neste processo, que a deformação horizontal total (deformação plástica e a elástica) seja igual a zero (Eq. 10).

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^p + \varepsilon_x^e = 0 \quad (10)$$

Assim, a Eq. 7 é reduzida à Eq. 11.

$$\nu \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (11)$$

Substituindo a Eq. 11 na Eq. 8, obtém-se a Eq. 12:

As constantes elásticas foram determinadas a partir dos dados experimentais do estágio linear de descarga obtidas pela relação entre pressão horizontal (σ_x) e vertical (σ_y) consideradas, assim, constantes (estado elástico de tensão). Por meio do processo de regressão linear dos valores experimentais determinou-se, pela inclinação da linha reta, a relação representada pela Eq. 13.

$$A = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \frac{\nu}{(1-\nu)} \quad (13)$$

Assim, a partir da determinação da constante, A, o coeficiente de Poisson (ν) é encontrado pelo emprego da Eq. 14.

$$\nu = \frac{A}{1+A} \quad (14)$$

O módulo de elasticidade (E) foi determinado pela relação $\varepsilon_y(\sigma_y)$ da Eq. 12, com os valores experimentais de ε_y e σ_y e pelo coeficiente de Poisson (ν) determinado como descrito acima, pela Eq. 14.

O segundo estágio (BC) caracterizado pela parte não-linear (curvilínea) da descarga, se inicia quando a tensão vertical (σ_y) é menor que o valor da tensão horizontal (σ_x); nesse estágio as deformações elásticas e plásticas coexistem simultaneamente assumindo, desta maneira, 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 Eq. 15.

$$\varepsilon_y = D_3 \ln \left[1 + D_4 (\sigma_y)^\beta \right] + D_5 \sigma_y \quad (15)$$

em que:

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

D5 - parâmetro elástico, adotado de Stasiak et al. (2001), adimensional

O ângulo de dilatância (ψ) utilizado para determinar a influência das distribuições de pressão sobre a parede do silo durante o carregamento e descarregamento, foi determinado ao se empregar os valores de deformação vertical e horizontal, como o exposto pela Eq. 16.

$$\psi = \frac{\Delta \varepsilon_y}{\Delta \varepsilon_x} \frac{h_0}{L} \quad (16)$$

em que:

- ψ - ângulo de dilatância, °
- $\Delta \varepsilon_y$ - variação na deformação vertical ao longo do tempo, m

$\Delta \epsilon_x$ - variação na deformação horizontal ao longo do tempo, m
 h_0 - altura inicial da amostra, m
 L - comprimento inicial da amostra, m

Um equipamento foi construído visando à determinação das propriedades mecânicas (Figura 2) sendo composto por dois semicírculos (A - Ponto de fixação à base e B - Extremidade livre), de raio 125,0 mm e altura de 200,0 mm; foi confeccionado em chapa de aço de espessura 6,35 mm e sua relação altura/diâmetro (H/D) é de 0,8 e o volume de $9,817 \times 10^{-3} \text{ m}^3$; possui duas abas laterais com distância entre si de 77,5 mm e equidistância das bordas de 55,0 mm e largura de 20,0 mm, em que foram posicionadas, em sua união, para fixação, quatro barras de alumínio ($E_{\text{Barras}} = 16,8 \text{ GPa}$).

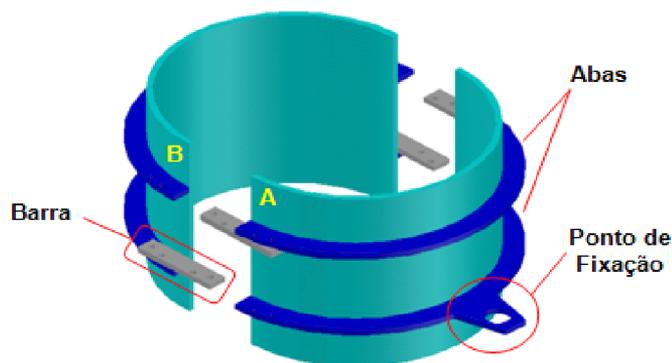


Figura 2. Equipamento para determinação das propriedades mecânicas dos produtos testados

Em cada barra foi posicionado um extensômetro para mensuração do deslocamento onde se mede a deformação. Também fazem parte deste equipamento duas tampas de mesmo diâmetro em que foram apoiadas uma célula de carga de 30 kN para registrar a força de compressão e um LVDT (Transdutor Diferencial Variável Linear) para registrar o deslocamento vertical e uma base para ancoragem do ponto de fixação (A).

O equipamento foi montado sobre a base de uma máquina universal de ensaios de 100 kN de capacidade de trabalho; em seguida, foi preenchido concentricamente e o produto nivelado na borda (Figura 3A); a tampa superior foi colocada e posicionados o LVDT e a célula de carga sobre a mesma (Figura 3B).

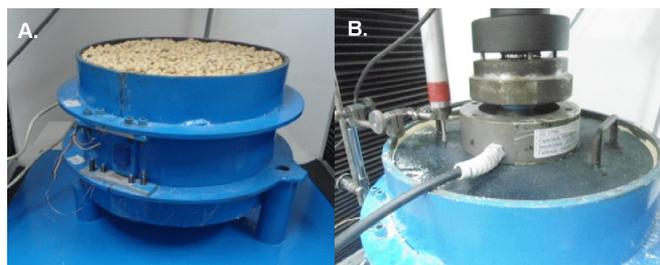


Figura 3. Vista do equipamento de determinação das propriedades mecânicas dos produtos. (A) Produto nivelado; (B) Ensaio em andamento

A máquina universal de ensaios foi programada para realização do ensaio de compressão com velocidade de 2 mm min^{-1} . Quando a carga de referência era alcançada, por exemplo, 5 kN, o botão de parada era acionado na máquina e imediatamente o pistão da mesma era submetido ao retorno do percurso até que o visor do equipamento sinalizasse que a força aplicada foi zerada.

O produto ensaiado era retirado do equipamento e revolvido; logo em seguida, este material era devolvido ao interior do equipamento sendo realizado novamente o procedimento descrito para as cargas de 5, 10, 15 e 20 kN em quadruplicada, para cada teor de umidade estudado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As propriedades de fluxo dos produtos são apresentadas na Tabela 1, para os teores de umidade de 10, 12 e 14% na condição instantânea. Constatou-se que o ângulo de atrito interno (ϕ) e efetivo ângulo de atrito interno (δ) tiveram um acréscimo em função do aumento do teor de umidade. O ângulo de atrito interno (ϕ) e efetivo ângulo de atrito interno (δ) dos grãos de arroz com teor de umidade de 10% possuem uma variação maior entre os limites, inferior e superior, em torno de 55,1 e 58,9%, respectivamente, podendo-se creditar, a esta ocorrência, o baixo teor de umidade e o formato do grão (oblongo).

Outro fato de destaque foi a maior variação dos limites inferior e superior (21°), obtida para o efetivo ângulo de atrito interno (δ) dos grãos de milho triturado com teor de 10%. Lopes Neto et al. (2009) encontraram, ao analisar dois tipos de ração avícola, um valor médio do ângulo de atrito de $45,1$ e $39,8^\circ$ para as rações A e B, respectivamente, e para

Tabela 1. Propriedades de fluxo dos produtos granulares e pulverulentos testados para cada teor de umidade

| Produtos | U (%) | γ (N m^{-3}) | | ϕ | | Δ ($^\circ$) | | ϕ_w | | C (Pa) | ff _c |
|---------------------|-------|--------------------------------|----------|----------|----------|-----------------------|----------|----------|----------|---------|-----------------|
| | | Inferior | Superior | Inferior | Superior | Inferior | Superior | Inferior | Superior | | |
| Arroz | 10 | 7955,89 | 8025,32 | 22 | 49 | 30 | 73 | 11,52 | 19,62 | 5734,20 | 4,25 |
| | 12 | 8037,07 | 8112,37 | 31 | 37 | 46 | 50 | 13,28 | 21,31 | 3267,60 | |
| | 14 | 8118,26 | 8189,10 | 40 | 43 | 43 | 47 | 12,77 | 23,68 | 1453,80 | |
| Milho triturado | 10 | 7944,67 | 8057,89 | 41 | 42 | 49 | 70 | 13,28 | 18,75 | 5601,10 | 2,24 |
| | 12 | 7613,02 | 7735,85 | 39 | 47 | 56 | 60 | 13,41 | 19,90 | 5219,70 | |
| Farinha de mandioca | 14 | 7721,97 | 7858,69 | 43 | 46 | 52 | 54 | 14,31 | 21,18 | 2424,50 | 3,62 |
| | 10 | 7042,11 | 7152,13 | 27 | 34 | 32 | 40 | 11,28 | 16,41 | 1456,00 | |
| | 12 | 7287,78 | 7437,32 | 27 | 36 | 41 | 50 | 5,77 | 12,04 | 2496,30 | |

γ - Peso específico consolidado; ϕ - Ângulo de atrito interno; δ - Efetivo ângulo de atrito interno; ϕ_w - Ângulo de atrito com a parede; C - Coesão; ff_c - Índice de fluxo

o efetivo ângulo de atrito interno os valores foram 47,6 e 42,6°, respectivamente, para as rações A e B. Esses valores correspondem ao intervalo dos dados encontrados para a farinha de mandioca.

A coesão (C), uma variável importante para determinação do fluxo, obteve o maior valor para os grãos de arroz a um teor de umidade de 10%. Nota-se que a farinha de mandioca possui menor coesão em relação aos outros produtos; entretanto, este fato pouco afeta a condição de fluxo coesivo comparado ao dos grãos de arroz a 10% de umidade.

Landillon et al. (2008) avaliaram as características de fluabilidade e coesão de farinha de trigo em diversas granulometrias e teores de umidade e concluíram que, com baixo teor de umidade, a distribuição regular do tamanho de partículas da farinha de trigo contribuiu significativamente para a capacidade de desenvolver fluxo. Com alto teor de umidade verificou-se que a fluidez e coesão são, em parte, dependentes de mecanismos físico-químicos e bioquímicos, como o efeito plastificante das moléculas de água presentes, prejudicando o fluxo.

O índice de fluabilidade dos grãos de arroz foi classificado como de fluxo fácil; os grãos de milho triturado estão em uma zona de transição entre o fluxo muito coesivo a coesivo; já a farinha de mandioca foi classificada como fluxo coesivo. Lopes Neto & Nascimento (2013) encontraram, para o milho triturado, um índice de fluxo de 3,8 classificado como de fluxo do tipo coesivo, assemelhando-se ao resultado obtido por este trabalho.

Ressalta-se, segundo estudo de Vasilenko et al. (2011) que a determinação da fluabilidade de produtos pulverulentos é de alta complexidade e sua avaliação depende da aplicação a que se deseja para o produto e que nenhum método isolado ainda pode ser confiavelmente recomendado.

A análise os dados obtidos para o coeficiente de Poisson na Tabela 2 para a etapa de carregamento (*) indica um destaque para os grãos de arroz em que estes obtiveram uma redução dos resultados em virtude do acréscimo do teor de umidade.

Para o coeficiente de Poisson (ν) da etapa de descarregamento, novamente se destacam os grãos de arroz, que exibiram um aumento do coeficiente de 25% entre os teores de umidade de 10 e 12%, e para o teor de umidade de 14% uma redução do coeficiente de 20% enquanto para os

Tabela 2. Valores médios das propriedades mecânicas dos produtos granulares e pulverulentos testados para cada teor de umidade 9 cm

| Produtos | Teor de umidade (b.u.) - % | ν^* | ν | E (MPa) | Ψ (°) |
|---------------------|----------------------------|---------|-------|---------|------------|
| Arroz | 10 | 0,15 | 0,15 | 13,83 | 15,48 |
| | 12 | 0,14 | 0,20 | 13,99 | 17,06 |
| | 14 | 0,12 | 0,16 | 10,43 | 21,69 |
| Milho triturado | 10 | 0,12 | 0,20 | 7,56 | 24,34 |
| | 12 | 0,13 | 0,19 | 6,30 | 29,47 |
| | 14 | 0,12 | 0,24 | 5,28 | 32,44 |
| Farinha de mandioca | 10 | 0,12 | 0,13 | 2,65 | 78,75 |
| | 12 | 0,12 | 0,13 | 3,42 | 75,63 |

ν^* - Coeficiente de Poisson para o carregamento; ν - Coeficiente de Poisson para o descarregamento; E - Módulo de elasticidade; Ψ - Ângulo de dilatação

grãos de milho triturados o que chamou a atenção foi a redução do coeficiente para o teor de umidade de 12%. A farinha de mandioca manteve o mesmo valor (0,13) do coeficiente independente do acréscimo de umidade. Ao determinar o coeficiente de Poisson de pellets de minério de ferro na fase de descarregamento, Gustafsson et al. (2013) encontraram um valor médio de 0,21; os autores ainda citam que para produtos granulares o coeficiente de Poisson médio tende a variar entre 0,15 a 0,30.

Molenda & Stasiak (2002) encontraram, ao investigar as propriedades elásticas de cinco produtos armazenáveis (cevada, aveia, trigo, centeio e sementes de canola) para o coeficiente de Poisson (ν) dos grãos de trigo, um valor máximo de 0,22 para o teor de umidade de 10% com uma carga aplicada de 100 kPa.

Molenda et al. (2006) trabalharam com farelo de trigo, açúcar, lentilha e trigo em dois laboratórios sendo um na Espanha e o outro na Polônia aplicando uma carga de compressão de 100 kPa. No laboratório espanhol o coeficiente de Poisson (ν) encontrado para a farinha de trigo foi de 0,26; para os grãos de lentilha ocorreu uma variação de 0,30 a 0,35; os grãos de trigo obtiveram os valores de 0,27 e 0,37 para os testes realizados em câmaras de ensaio de diâmetros iguais a 38 e 101 mm, respectivamente. No laboratório polonês o coeficiente de Poisson (ν) encontrado para a farinha de trigo foi de 0,16; para os grãos de lentilha, 0,24; para o trigo em grãos de 0,19 a 0,22 para uma variação no teor de umidade de 10 a 20%. Em ambos os laboratórios o coeficiente de Poisson para o açúcar foi encontrado igual a 0,21.

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

Os valores obtidos para o módulo de elasticidade (E) expostos na Tabela 2 indicaram para os grãos de arroz uma pequena variação entre os teores de umidade de 10 e 12% e que o valor obtido para o teor de umidade de 14 é 25,45% menor que o do teor de umidade de 12%; já os resultados dos grãos de milho triturado demonstram que o maior valor (7,56 MPa) foi obtido para o menor teor de umidade e o menor valor (5,28 MPa) para o maior teor de umidade, sendo esta diferença entre os extremos de 30,16%.

A farinha de mandioca foi a que teve o menor valor (2,65 MPa) do módulo de elasticidade para o menor teor de umidade estudado em que é observado, também, um aumento do resultado com o acréscimo de umidade.

Stasiak et al. (2007) chegaram a uma variação do módulo de elasticidade (E) de 10 a 32 MPa para um intervalo de umidade de 10 a 20%, respeitando as condições de ambos os trabalhos e encontraram, para os grãos de milho triturado, um valor médio para o módulo de elasticidade (E), de 7,56 MPa para o teor de umidade de 10%.

Os resultados obtidos dos ângulos de dilatação (Ψ) dos grãos expostos na Tabela 2 definem que estes aumentam o ângulo do plano com a normal à medida que é acrescida umidade ao produto. As diferenças entre os extremos valores obtidos tanto para os grãos de arroz e quanto para os de milho

triturado não ultrapassaram a 31%. Os ângulos de dilatância da farinha de mandioca se destacaram pelo alto valor obtido sendo o maior resultado creditado ao menor teor de umidade contrariando o que foi observado para os grãos (aumento do ângulo com acréscimo do teor de umidade).

Ayuga et al. (2001) relatam que o ângulo de dilatância é um dos dados necessários para se usar o critério de elastoplástico de Drucker-Prager e para as definições das regras de fluxo que determinam a direção da plasticidade.

Os grãos de arroz e de milho triturado estão enquadrados na classificação dos autores supracitados ao se afirmar que quando o ângulo de dilatância (ψ) é menor que o ângulo de atrito interno (ϕ) haverá menos expansão volumétrica.

Os ângulos de dilatância diminuíram com o aumento da carga (Moya et al., 2006; Ramírez et al., 2010). Moya et al. (2006)

também verificaram tal tendência; à medida em que a pressão vertical aumenta o deslocamento horizontal das partículas é dificultado aumentando sua resistência global ao cisalhamento como, por exemplo, a farinha de soja, que manteve esta tendência para dilatar sobre diferentes pressões verticais.

A Figura 4 reúne as curvas de tensão versus deformação na qual se pode observar similaridade entre os resultados na fase de carregamento com diferença média entre as cargas aplicadas de 100 kPa. As maiores deformações observadas na farinha de trigo, Figura 4C, atingiram valores 75 e 64% superiores aos registrados para grãos de trigo e milho triturado, respectivamente enquanto na fase de descarregamento e em especial para farinha de trigo, Figura 4C, as deformações plásticas finais sofridas pelas amostras nas cargas de 10, 15 e 25 kN, ficaram entre 75000 e 80000 $\mu\text{m m}^{-1}$ evidenciando elevado potencial de compactação e dificuldade de fluxo. Nas Figuras 4A e 4B, respectivamente, os valores variaram entre 15000 e 3000 $\mu\text{m m}^{-1}$.

CONCLUSÕES

1. O índice de fluabilidade dos grãos de arroz encontrado foi classificado como de fluxo fácil, dos grãos de milho triturado de fluxo muito coesivo a coesivo e do produto pulverulento (farinha de mandioca) fluxo coesivo.

2. O coeficiente de Poisson para etapa de carregamento (ν^*) obteve valores inferiores aos obtidos para etapa de descarregamento (ν) de todos os produtos.

3. O módulo de elasticidade para os grãos decréscimo e para o produto pulverulento teve acréscimo dos valores com a elevação do teor de umidade.

4. O ângulo de dilatância dos grãos aumentou e do produto pulverulento decresceu em relação à elevação do teor de umidade.

5. A farinha de trigo possui elevada capacidade de desenvolver deformações plásticas o que pode representar dificuldades na obtenção de fluxo.

AGRADECIMENTO

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos concedida e ao Grupo de Estudos em Silos (Silos) e ao Grupo de Estudos em Construções e Ambiente (GCAMB) da Universidade Federal de Campina Grande, pelo apoio em prol da realização desta pesquisa.

LITERATURA CITADA

- Ayuga F; Guaita M; Aguado P. Discharge and the eccentricity of the hopper influence on the silo wall pressures. *Journal of Engineering Mechanics*, v.127, p.1067-1074, 2001.
- Gustafsson, G.; Häggblad, H. A.; Jonsén, P.; Marklund, P. Determination of bulk properties and fracture data for iron ore pellets using instrumented confined compression experiments. *Powder Technology*, v.241, p.19-27, 2013.

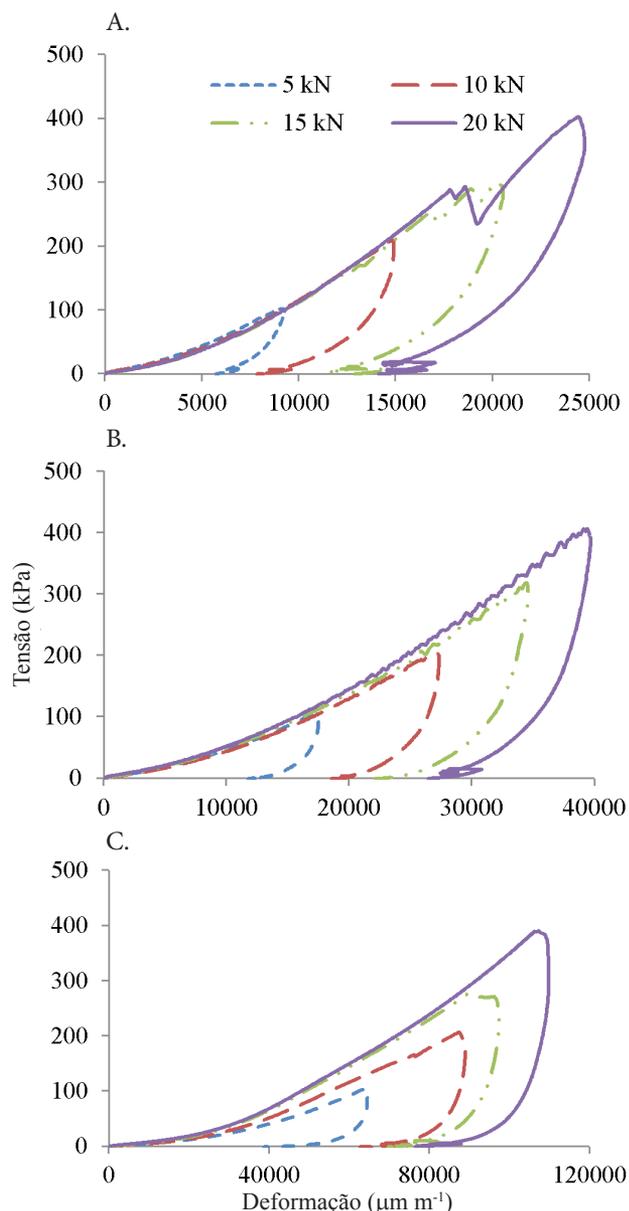


Figura 4. Diagramas de tensão versus deformação: arroz (A); milho triturado (B); e farinha de mandioca (C)

- Jenike, A. W. Storage and flow of silos. Utah Engineering Experiment Station. Salt Lake City: University of Utah. 1964. 197p. Bolletim, 123.
- Landillon, V.; Cassan, D.; Morel, M.; Cuq, B. Flowability, cohesive, and granulation properties of wheat powders. *Journal of Food Engineering*, v.86, p.178-193, 2008.
- Lopes Neto, J. P. Análise teórico-experimental das forças verticais e de atrito em silos cilíndricos. Campina Grande: UFCG. 2009. 136p. Tese de Doutorado
- 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, p.339-345, 2013.
- Lopes Neto, J. P.; Silva, V. R. da; Nascimento, J. W. B. do Propriedades de fluxo de produtos pulverulentos alimentícios. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.639-644, 2009.
- Madrona, F. S. Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica. São Carlos: EESC/USP, 2008. 196p. Dissertação Mestrado
- Molenda, M.; Stasiak, M. Determination of the elastic constants of cereal grains in a uniaxial compression test. *Institute of Agrophysics*, n.16, p.61-65, 2002.
- Molenda, M.; Stasiak, M.; Moya, M.; Ramirez, A.; Horabik, J.; Ayuga, F. Testing mechanical properties of food powders in two laboratories - Degree of consistency of results. *Institute of Agrophysics*, n.20, p.37-45, 2006.
- Moya, M.; Ayuga, F.; Guaita, M.; Aguado, P. J. Mechanical properties of granular agricultural materials considered in silos design. In: *Engineering Mechanics Conference - ASCE*, 15 th, 2002, New York: Columbia University, CD Rom
- Moya, M.; Guaita, M.; Aguado, P.; Ayuga, F. Mechanical properties of granular agricultural materials, Part 2. *Transactions of the ASABE*, v.49, p.479-489, 2006.
- PN-89/B-03262. Polish Standard. Concrete bins for storing granular materials and silage. Design rules. Lublin: Polish, 1989. 12p.
- Ramírez, A.; Moya, M.; Ayuga, F. Determination of the mechanical properties of powdered agricultural products and sugar. *Inter Science*, v.26, p.220-230, 2010.
- Sawicki, A. Elasto-plastic interpretation of oedometric test. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, v.41, p.111-131, 1994.
- Stasiak, M.; Molenda, M.; Horabik, J. Determination of modulus of elasticity of cereals and rapeseeds using acoustic method. *Journal of Food Engineering*, v.82, p.51-57, 2007.
- Stasiak, M.; Molenda, M.; Rusinek, R.; Horabik, J. Właściwości mechaniczne złoża nasion rzepaku wyznaczone w teście jednoosiowego ściskania. *Acta Agrophysica*, v.46, p.167-178, 2001.
- Vasilenko, A.; Glasser, B. J.; Muzzio, F. J. Shear and flow behavior of pharmaceutical blends-Method comparison study. *Powder Technology*, v.208, p.628-636, 2011.