



## **DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES ELÁSTICAS DE SÓLIDOS GRANULARES.**

Diego Batista de Lucena<sup>1</sup>, José Wallace Barbosa do Nascimento<sup>2</sup>

### **RESUMO**

Visando fornecer maiores informações sobre a determinação das propriedades elásticas de produtos sólidos granulares, a presente pesquisa teve o objetivo de desenvolver um equipamento para estas determinações, principalmente o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Foram utilizadas deduções matemáticas da teoria da elasticidade para utilização dos dados. O equipamento proposto permitirá as determinações específicas das propriedades elásticas de sólidos utilizados no armazenamento em silos verticais, e subsidiará pesquisas com simulação de fluxo e cálculo de pressão utilizando o método de elementos finitos.

**Palavras-chave:** Propriedades elásticas, grãos, teste uniaxial

### **DEVELOPMENT OF EQUIPMENT FOR DETERMINATION OF ELASTIC PROPERTIES OF SOLID GRANULES.**

### **ABSTRACT**

To provide more information on determining the elastic properties of granular solids, this research aimed to develop an equipment for determination of the elastic properties of granular and powders solids, especially of the elasticity modulus and Poisson's coefficient. It was used mathematical deductions of the theory of elasticity for using the data. The equipment will allow the specific determination of the elastic properties of storable solids in vertical bins and subsidize research on flow simulation and calculation of pressure using the method of finite elements.

**Keywords:** elastic properties, grains, uniaxial test.

### **INTRODUÇÃO**

Obeve-se nas últimas décadas um grande avanço científico sobre o fluxo de produtos sólidos em silos, sobretudo quanto ao conhecimento de problemas relacionados ao seu manuseio e armazenagem em escala industrial, o qual foi agravado pelo surgimento, nos últimos anos, em quantidade e variedade, de novos produtos sólidos. Com isto, as indústrias foram obrigadas a desenvolver novos sistemas de armazenagem, manuseio e transporte cada vez mais eficientes a fim de que as etapas de produção industrial fossem realizadas de forma satisfatória.

Em geral, as indústrias têm problemas com produtos, sejam eles na forma granular ou pulverulenta, uma vez que os sólidos, ao contrário dos líquidos, transmitem tensões de cisalhamento em condições estáticas e, quando comprimidos, aumentam sua coesão, proporcionando interferências na descarga e, em consequência, paralisações parciais ou totais do processo industrial, o que pode acarretar sérios prejuízos econômicos.

<sup>1</sup> Aluno do Curso de Engenharia Civil, Depto. de Engenharia Civil, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: [diegab Batista@hotmail.com](mailto:diegab Batista@hotmail.com)

<sup>2</sup> Engenheira Agrícola, Prof. Doutor, Depto. de Engenharia Agrícola, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: [wallace@deag.ufcg.edu.br](mailto:wallace@deag.ufcg.edu.br)

A incessante busca pelo armazenamento adequado desses produtos sólidos, advindo do aumento considerado da população mundial, fez crescer de forma paralela, os estudos sobre o comportamento desses produtos nas unidades armazenadoras.

Os produtos (sólidos granulares) são importantes componentes em inúmeros processos industriais: Indústrias produtoras de produtos químicos, cosméticos, produtos farmacêuticos, cerâmica, alimentação, energia, papel/madeira, metais, cimento, vidro, minerais, produtos de consumo, plásticos, e vários outros produtos. Uma única mudança nas condições físicas desses produtos pode drasticamente alterar o desempenho de um processo em determinada indústria.

Apesar dos produtos granulares parecerem simples, eles exibem uma surpreendente gama de comportamentos complexos que tem sido largamente inexplorado. A investigação nesta área que tem sido intensivamente realizado nos últimos 40 anos, onde apresenta importantes implicações para a indústria transformadora e dos novos processos.

Dentre os principais obstáculos enfrentados pelas indústrias que manuseiam produtos pulverulentos se destacam a formação de arcos coesivos capazes de restringir, parcial ou completamente, a descarga cuja ocorrência está intrinsecamente relacionada às geometrias dos silos e tremonhas, às propriedades físicas e de fluxo dos produtos sólidos e condições ambientais.

A busca eminente pelo armazenamento adequado desses diversos produtos, incrementou de forma acelerada os estudos sobre o comportamento de carga e descarga. O armazenamento de produtos em silos permite uma maior conservação do produto, reduzindo custos referentes a espaços utilizados, mão de obra e transporte disponível, além de possibilitar a espera de aumento de preço dos grãos, para se obter uma maior rentabilidade. Porém, o grande problema no processo de carregamento, armazenagem e descarregamento se encontra na definição das propriedades dos produtos a serem armazenados, onde a granulometria, teor de umidade, densidade, dentre outros, irão interferir diretamente no desenvolvimento do fluxo no silo para o produto analisado.

O conhecimento das propriedades físicas e de fluxo dos produtos armazenados é essencial para o processamento dos sistemas de armazenagem durante o carregamento e o descarregamento. Sendo os parâmetros conhecidos, é possível a determinação e a predição das pressões que ocorrerão na estrutura e, principalmente, os tipos de fluxo.

Atualmente utiliza-se para simulação o método dos elementos finitos, seja no desenvolvimento de programas específicos para determinada situação de engenharia ou o uso de software comercial, em ambos exige-se o conhecimento do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Na simulação do escoamento de sólidos em silos se faz necessário conhecer estas duas propriedades elásticas.

Essas propriedades elásticas são cruciais para a estimativa das pressões exercidas sobre as paredes pelos produtos sólidos armazenados. As constantes elásticas: módulo de elasticidade  $E$ , e o coeficiente de Poisson  $\nu$ , são baseadas no pressuposto da elasticidade de produtos granulares, para certo nível de consolidação e pressão (Sawicki e Ewidziński, 1998). Estes parâmetros são fundamentais para simulações das ações nas paredes e do fluxo em silos, utilizando o método dos elementos finitos.

Portanto o objetivo deste trabalho foi desenvolver um equipamento para determinar as propriedades elásticas: módulo de elasticidade  $E$ , e coeficiente de Poisson  $\nu$ , de produtos sólidos armazenados em silos verticais, para serem empregados na simulação pelo método dos elementos finitos.

## MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente do Departamento de Engenharia Agrícola no Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande – PB. Para a determinação das deformações ocorridas ao longo do carregamento, foi desenvolvido um equipamento para verificar a variação da deformação transversal devido à aplicação de forças verticais na parte superior do silo. Para construção do equipamento utilizou-se a metodologia proposta adotada para a determinação das propriedades elásticas dos sólidos granulares segundo o modelo de Sawicki (1994).

O equipamento é constituído de dois semicírculos de aço, com espessura 5 mm. Com um diâmetro de 26 cm e uma altura de 26 cm. Foram colocados dispositivos colantes para propiciar o deslocamento horizontal de um dos semicírculos, enquanto o outro será engastado. Para a determinação do deslocamento linear horizontal utilizar-se-á extensômetros elétricos colados em quatro células de carga, diametralmente opostas, que serão conectadas a um sistema de aquisição de dados.

Para obtenção das respectivas deformações ocorridas no período dos carregamentos e descarregamentos será utilizado um programa computacional, que de forma direta irá detectar as respectivas deformações nos produtos sólidos granulares. O programa utilizado para quantificar as deformações nos sólidos será o CATMAN/SPIDE.

Com as respectivas deformações quantificadas será possível não só determinar as propriedades elásticas dos sólidos granulares, mas também conhecer a intensidade das tensões laterais desenvolvidas ao longo do esforço.

Simultaneamente serão determinadas a força axial aplicada e as respectivas tensões nas paredes do silo, por meio de células de cargas. Apresenta-se na Figura (1), o esquema construtivo do equipamento proposto.

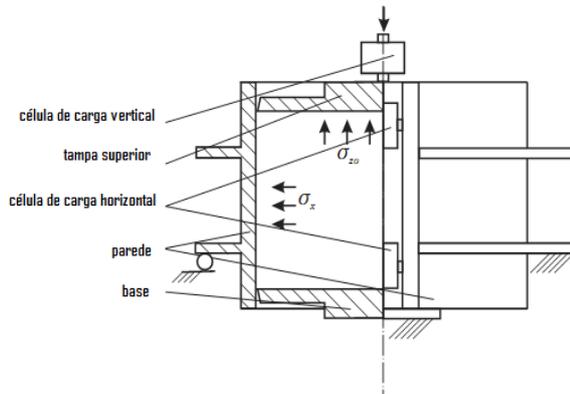


Figura 1. Esquema construtivo do equipamento

Dentro do limite de elasticidade, a razão linear da força a ser excedida é denominada de módulo de elasticidade ou módulo de Young's,  $E$ , que estão ligadas as propriedades intrínsecas específicas de cada produto estudado. O módulo tangente de elasticidade pode ser definido como o declive do diagrama de tensão-deformação em relação a algum ponto tomado como referencia. Já o coeficiente de Poisson,  $\nu$ , pode ser definido como a razão de contração transversal exercida pela força na extensão longitudinal esticada em uma barra, em resumo, define-se como a razão entre a deformação transversal associada a uma deformação longitudinal na direção do esforço. Um modelo que descreve a tensão vertical total em materiais granular sob carregamento foi desenvolvido por Sawicki (1994). Esta teoria baseia-se na abordagem elasto-plástico assumida durante a fase de carga tanto reversível (elástica) e irreversível (plástica), desenvolvidas por tensões na amostra.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para determinação dos parâmetros de elasticidade dos diversos produtos granulares utilizar-se-á um modelo em que a tensão de compressão vertical exercida nos produtos granulares sob carregamento foi baseada na teoria elasto-plástico assumida durante as formas citadas anteriormente e desenvolvidas por tensões aplicadas na amostra. As deformações são representadas como: Plástica  $\mathcal{E}_z^p$  e elástica  $\mathcal{E}_z^e$ . Deformações essas que se desenvolveram no produto durante o carregamento:

$$\mathcal{E}_z = \mathcal{E}_z^e + \mathcal{E}_z^p \quad (1)$$

Logo, a equação (1) pode ser representada como:

$$\mathcal{E}_z = D_1 \ln(1 + D_2 \sigma_{zo}^\alpha) + \frac{\sigma_{zo}}{E} \left( 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right) \quad (2)$$

Onde:  $\mathcal{E}_z$  - deformação vertical total,  $\mathcal{E}_z^p$  - deformação vertical plástica,  $\mathcal{E}_z^e$  deformação vertical elástica,  $\sigma_{zo}$  significa a pressão vertical exercida sobre a tampa superior,  $E$  módulo de elasticidade e  $\nu$  o equivalente de Poisson para a razão da carga que se resume a razão entre a deformação horizontal  $\mathcal{E}_x$  e a deformação vertical  $\mathcal{E}_{zo}$  durante a consolidação da amostra. Enquanto:  $\sigma_x = K_0 \sigma_{zo}$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  e  $\alpha$  - são modelos paramétricos. Logo  $K_0$  é utilizado para calcular o equivalente de Poisson  $\nu$  durante a carga. Que se resume a razão entre a tensão horizontal  $\sigma_x$  e a tensão vertical  $\sigma_{zo}$ , durante a consolidação do material em estudo (amostra).

Originalmente Sawicki (1994) assumiu o valor do expoente  $\alpha$  como sendo seu valor igual a 1.5, mas, na nesta análise, o valor de  $\alpha$  será tratado como uma variável para obter um melhor ajuste dos parâmetros em questão.

Durante o período de carregamento duas fases podem ser observadas. A primeira caracterizada por uma deformação elástica e a segunda pela ação de uma deformação elástica – plástica. Logo pela lei de hook:

$$\varepsilon_x^e = \frac{1}{E} \left( (1-\nu)\sigma_x - \nu\sigma_{zo} \right) \quad (3)$$

$$\varepsilon_z^e = \frac{1}{E} \left( \sigma_{zo} - 2\nu\sigma_x \right) \quad (4)$$

Supondo que,  $\varepsilon_x^e = 0$  da equação (3) temos:

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_{zo}} = \frac{\nu}{1-\nu}$$

Aplicando-se na equação (4) a hipótese de que:  $\varepsilon_z = \varepsilon_z^e$  logo, a deformação vertical total pode ser expressa como:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_{zo}}{E} \left( 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right) \quad (5)$$

Valores do módulo de elasticidade  $E$  serão estimados usando a relação:  $\sigma_z(\sigma_{zo})$  na Equação 2, com os valores experimentais de  $\varepsilon_z$ ,  $\varepsilon_{zo}$  e  $\nu$  determinados como descrito acima.

A razão da tensão horizontal  $\sigma_x$  e a tensão vertical  $\sigma_{zo}$  foram assumidas constantes (estado elástico de tensão) e do declive da porção reta da curva no estado de carregamento e descarregamento (Figura 2.) encontramos:

$$A = \frac{\sigma_x}{\sigma_{zo}} = \frac{\nu}{1-\nu}$$

Conhecendo-se os valores da razão entre as tensões horizontais e verticais obtêm-se de forma direta o coeficiente de Poisson. Idem a Equação 4.

As tensões desenvolvidas ao longo do carregamento estão ligadas diretamente as deformações ocorridas ao longo do processo de carga e descarga dos produtos granulares. Produtos esses que possuem de forma particular suas propriedades características e parâmetros, sejam elásticas, sejam físicas. Cada material devido a particularidade existente de suas propriedades, também possui um coeficiente de Poisson específico associado. O que permite relacionar os diversos produtos sólidos granulares as suas particulares propriedades.

Para a determinação das modificações (deformações) ocorridas ao longo do contínuo carregamento e descarregamento uniaxial resultante da parte superior dos silos (Figura 1), inicialmente confrontamos as teses e as formulações a cerca do assunto levando em conta suas discrepâncias e eventuais critérios para suas aplicações, onde futuramente serão avaliadas pelo método teórico-prático referente as pesquisas.

As amostras quando submetidas aos sucessivos programas de cargas e descargas verticais, deverão apresentar comportamento específico, característico do produto em utilização. Características essas que estão associadas as seus possíveis comportamentos durante a fase de carga e descarga, e que poderão ser identificadas através das análises dos resultados obtidos por meio de gráficos dos seus respectivos estados de carregamento e descarregamento, obtidos durante a realização dos ensaios e que posteriormente serão de maneira direta confrontadas com a teoria desenvolvida para aplicação da especificações requeridas para utilização do equipamento em questão

Quando iniciada as experimentações utilizando o equipamento aqui proposto, será possível expor os dados em forma de gráficos de fluxo tanto na fase plástica, quanto na fase elástica.

A análise gráfica dos resultados terá com ponto principal o comportamento das curvas das respectivas deformações ocorridas durante o período em que os produtos estiverem submetidos aos esforços normais verticais.

Logo, utilizando o gráfico da Figura 2, pode-se analisar o comportamento das possíveis deformações ocorridas no material durante o carregamento ou descarregamento em que foi submetido à amostra para análise.

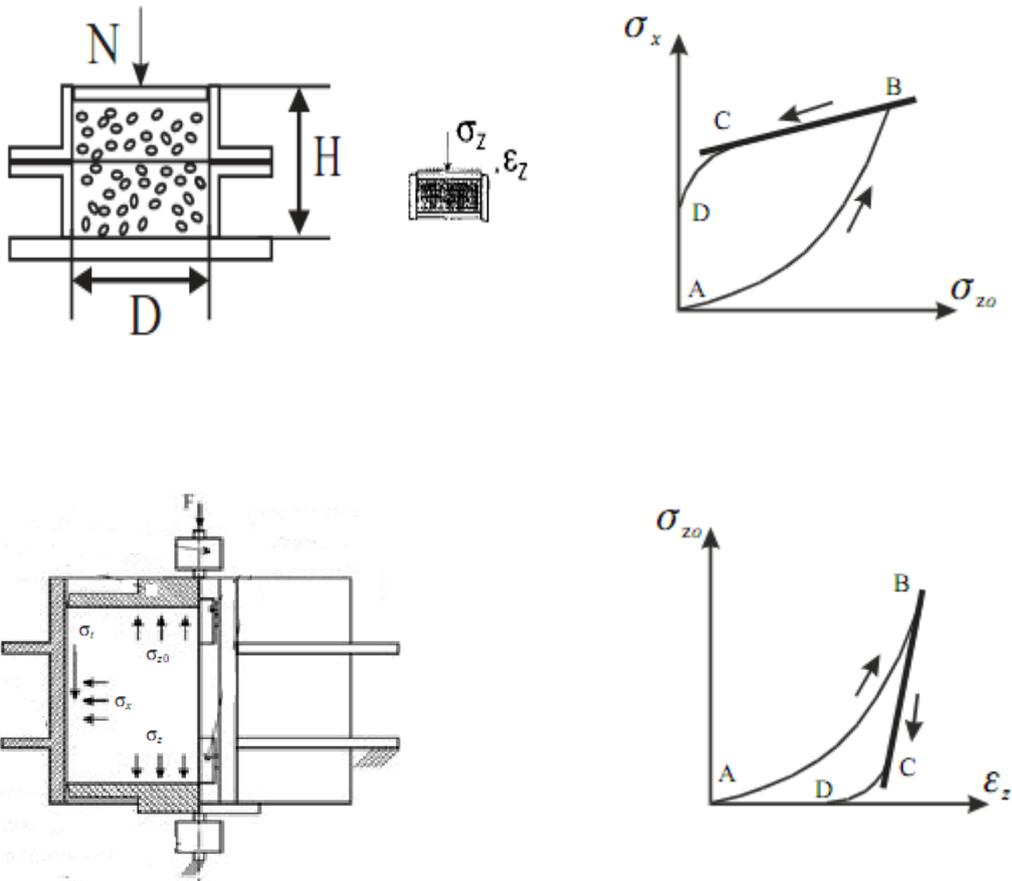


Figura 2. Comportamento do material quando submetido a compressão uniaxial.

Todos os resultados serão interpretados em função da tensão vertical atuante no equipamento e do deslocamento ocorrido em função da aplicação das cargas axiais. Durante os estados de carregamento e descarregamento será possível monitorar todo o comportamento não só da parte física dos produtos sólidos granulares e pulverulentos mais principalmente suas propriedades e estados durante todo o processo em que estiverem submetidos aos esforços.

## CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos nesta pesquisa experimental, onde se desenvolveu um equipamento para determinação das propriedades elásticas de sólidos granulares, especificamente o módulo de elasticidade  $E$ , e o coeficiente de Poisson  $\nu$ , Conclui-se que:

- O equipamento desenvolvido é adaptado do modelo proposto por Andrzej Sawicki.
- Será utilizado para determinação experimental das propriedades elásticas dos produtos sólidos armazenáveis em silos.
- Resultados experimentais serão interpretados em termos da tensão de compressão vertical e do deslocamento vertical (deformação), que serão obtidos durante os ensaios.
- subsidiará pesquisas com simulação de fluxo e cálculo de pressões utilizando o método de elementos finitos.

## AGRADECIMENTOS

A UFCG e ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HORABIK, J.; MOLEND, M. Physical properties of granular food materials - draft of the catalogue (in Polish). **Acta Agrophysica**, 74, 2002
- SAWICKI A., Elasto-plastic interpretation of oedometric test. **Archives of Hydro Engineering and Environmental Mechanics**, v.41, n.1-2, p.111-131, 1994.
- MOLEND, M.; STASIAK, M. Determination of elastic constants of cereal grain in uniaxial compression. **Int Agrophysics**, v.16, p.61-65, 2002
- STASIAK, M.; MOLEND, M. Direct shear testing of food powders flowability - influence of deformation speed and apparatus stiffness. **Acta Agrophysica**, v.4, n.2, p.557-564, 2004
- RAMIREZ, A., MOYA, M.; AYUGA, F. **Determination of mechanical properties of Agricultural powder Materials and Sugar to be used in Silos Design**. Paper No. 046092, 2004.
- THOMPSON, S.A.; ROSS, I.J. Thermal stresses in steel grain bins using the tangent modulus of grain. **Transactions of the ASAE**, v.16, n.3, p.165-168. 1984.
- ZHANG, Q.; PURI, V.M.; MANBECK, H.B.; WANG, M.C. Elastoplastic constitutive parameters of en masse wheat for a cyclic load model. **Transactions of the ASAE**,v.31, n.3, p.910-916, 1988.