Influência da Variedade do Grão de Arroz na Resistência ao Cisalhamento e nas Pressões Horizontais sobre a Parede de um Silo Cilíndrico

Flávio Vieira da Silva Junior¹ André Lubeck² Magnos Baroni³

Resumo

Usou-se o ensaio de cisalhamento direto, amplamente empregado na determinação de resistência ao cisalhamento dos solos, para determinar o ângulo de atrito interno de diferentes variedades de grãos de arroz. Foram utilizadas as variedades de arroz Puitá, Sinuelo, 424, 417 e 426, todas com umidade padrão de 13 %. Foram realizadas análises granulométricas segundo a NBR 7181 (1984), a caracterização dos grãos e determinação do peso específico aparente foram realizadas segundo a NBR NM53 (2009) e o ensaio de cisalhamento direto a partir das predicações da ASTM 3080 (1990). Foi avaliada também a variação do peso específico aparente em função da pressão vertical exercida. Através da análise dos resultados é perceptível que a variedade do arroz tem influência sobre suas características físicas, variando o peso específico e o ângulo de atrito interno.

Palavras-chave: Cisalhamento Direto, Arroz, Ângulo de Atrito interno.

1 Introdução

O Brasil é o nono maior país produtor de arroz do mundo, sendo o maior produtor do ocidente. Neste cenário, o Estado do Rio Grande do Sul é o maior produtor nacional de arroz, contribuindo com mais de 68 % da produção brasileira, IRGA (2015).

Em função das muitas variáveis que envolvem a produção de uma cultura agrícola, tais como tipo de solo, clima, pragas, entre outros, a busca por variedades de grãos que melhor se adaptam a cada região é constante. Segundo o Instituto Riograndense do Arroz (IRGA), na fronteira oeste do Rio Grande do Sul, as variedades mais cultivadas são: Puitá, Sinuelo, 424, 417 e 426. Cada variedade tem características físicas de grão distintas, tais como o tamanho do grão, peso específico e rugosidade da casca.

Para o dimensionamento de estruturas de armazenagem de grãos, como silos e galpões, é relevante o conhecimento das propriedades físicas do grão, pois estas influenciarão nas esforços aplicados sobre a estrutura. Segundo CALIL JR. (1990) uma das propriedades mais importantes é o ângulo de atrito externo estático medido por meio do ensaio de atrito de Jenike.

O ângulo de atrito externo é dependente da rugosidade e formato do grão, propriedades que variam em função da variedade de grão de arroz. Sendo assim, é pertinente o estudo que busque obter o ângulo de atrito em função da variedade de maneira a determinar se há variação significativa nas silicitações que poderiam atuar sobre as estruturas de armazenagem.

CALIL JR. (2007) aponta que no Brasil não há um banco de dados ou normas que determinem o ângulo de atrito do grão para desenvolvimento de projetos de silos de armazenagem. Apenas a NBR 6120 (1980) fornece para fins de projeto, o valor de ângulo de atrito do arroz de 36° e peso especifico aparente de 0,55 g/cm³.

Usando-se a analogia com o estudo de solos, é plausível empregar o ensaio de cisalhamento direto para obtenção do ângulo de atrito. O ensaio de cisalhamento direto permite obter o ângulo de atrito interno do material. Para fins de dimensionamento os ângulos de atrito interno e externo do arroz são considerados equivalentes, CALIL JR. (2007).

O ensaio de cisalhamento direto é amplamente empregado na determinação de resistência ao cisalhamento dos solos, e se baseia diretamente no critério de COULOMB, LAMBE & WHITMAN (1979).

¹ Acadêmico da Universidade Federal do Pampa, flaviovisiju@gmail.com

² Professor da Universidade Federal do Pampa, andrelubeck@unipampa.edu.br

³ Professor da Universidade Federal de Santa Maria, magnosbaroni@unipampa.edu.br

Aplica-se uma tensão normal num plano e verificase a tensão cisalhante que provoca a ruptura. Com o ensaio são obtidos o ângulo de atrito interno e coesão do material, parâmetros que caracterizam a resistência ao cisalhamento da amostra.

FREITAS e CALIL JUNIOR (2005) compararam as formulações apresentadas nas normas internacionais para a obtenção das pressões atuantes em silos, com resultados experimentais obtidos para grãos com diferentes propriedades físicas. Os autores testaram diferentes relações altura/diâmetro para silos metálicos e observaram grande divergência entre os valores apresentados pelas normas e os medidos. Foram propostas duas equações diferentes a depender da relação altura/diâmetro. As equações são função do ângulo de atrito e do peso específico do grão, duas propriedades avaliadas neste estudo.

Mais uma vez usando a analogia com o estudo de solos, sabe-se que materiais granulares tem o peso específico dependente do grau de compactação. No caso de cereais armazenados em silos, o peso da massa de grãos confinada faz com que o peso específico na região inferior do silo seja maior que na região superior. No entanto, o quanto o peso específico dos grãos de arroz varia em função da pressão exercida não é conhecido.

O presente trabalho visa avaliar a influência da variedade do grão de arroz sobre o ângulo de atrito interno, medido através do ensaio de cisalhamento direto, e sobre as pressões horizontais atuantes sobre as paredes de um silo metálico. Da mesma forma buscou-se avaliar a influência da pressão vertical sobre o peso específico aparente para as diferentes variedades estudadas.

2 Metodologia

Foram utilizadas as variedades de arroz Puitá, Sinuelo, 424, 417 e 426 obtidas junto ao Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), com umidade padrão de 13 %. Para todas as variedades foram realizadas análises granulométricas segundo a NBR 7181 (1984), caracterização dos grãos e determinação do peso específico aparente segundo a NBR NM53 (2009) e o ensaio de cisalhamento direto, ASTM 3080(1990).

As amostras foram moldadas por chuveiramento, utilizando o funil com abertura de 3,0 cm, e altura de queda de 100 cm (Figura 1).

Cada variedade de arroz foi ensaiada nas tensões normais de 25, 100, 175, 250 kPa. Utilizou-se molde de 10 cm x 10 cm (largura e comprimento), e altura do corpo de prova de 2 cm.

Durante a execução do ensaio de cisalhamento direto foram tomadas três diferentes leituras: desloca-

mento horizontal, força cisalhante aplicada e deslocamento vertical, o qual fornece a variação de volume do corpo-de-prova. A Figura 2 apresenta o ensaio sendo executado.



Figura 1 – Moldagem dos corpos de prova.



Figura 2 – Ensaio de cisalhamento direto em execução.

Para a avaliação da variação do peso específico em função da pressão vertical exercida, foram ensaiadas apenas as variedades 424, 426 e Puitá. As amostras foram moldadas por chuveiramento em um cilindro metálico de diâmetro de 160 mm e altura de 350 mm (Figura 3). O ensaio foi realiado em uma prensa Emic servo-controlada com capacidade de 200 kN. As amostras foram submetidas a quatro níveis de pressão: 0, 31,8, 63,7, 95,5 e 127,3 kPa. Essas pressões visavam simular a pressão vertical exercida nas profundidades de 0, 5, 10, 15 e 20 m em um silo de armazenagem. Para cada pressão eram tomadas quatro medidas da variação de altura da amostra de maneira a se determinar a sua variação de volume.



Figura 3 – Cilindro usado na avaliação do peso específico aparente em função da pressão vertical exercida.

A fim de verificar a influência que a variação das propriedades físicas das diferentes variedades de arroz sobre as pressões horizontais exercidas sobre a parede de um silo metálico cilíndrico, foram aplicadas as equações apresentadas por FREITAS e CALIL JUNIOR (2005) para a pressão horizontal. Segundo os autores, as pressões atuantes são dependentes da razão altura/diâmetro do silo h/d. Para relações h/d ≤ 1 a melhor aproximação é dada pela Equação 1. Já para razões h/d ≥ 1 a pressão é dada pela Equação 2.

se
$$h/d \le 1$$
 $p_h(z)' = \gamma . z.K$ (1)

onde $p_h(z)$ é a pressão horizontal sobre a parede do silo, dependente da profundidade z. γ é o peso específico do grão, d é o diâmetro do silo, μ_w é o coeficiente de atrito entre o grão e a chapa, adotado igual a 0,37 para o aço corrugado, (SCALABRIN, 2008). E K é o coeficiente de proporcionalidade entre as pressões horizontais e as verticais. Os pesos específicos adotados para o cálculo das pressões foram os apresentados na Tabela 1, pois as equações apresentadas na literatura não computam a variação do peso específico em função da pressão vertical exercida.

O parâmetro K foi calculado segundo a proposição de HARTMANN (1966) *apud* NASCIMENTO, (2008), Equação 3.

$$K = \frac{1 - \phi \operatorname{sen}^2}{1 + \phi \operatorname{sen}^2} \tag{3}$$

onde ϕ é o ângulo de atrito medido no ensaio de cisalhamento.

3 Resultados

A partir da caracterização e avaliação do peso específico aparente foram obtidos os valores apresentados na Tabela 1. As curvas granulométricas das variedades testadas são apresentadas na Figura 4. Os valores encontrados de ângulo de atrito e coesão estão apresentados na Tabela 2 e a Figura 5 apresenta os gráficos obtidos no ensaio de cisalhamento para cada uma das variedades.

Tabela 1 – Peso específico Aparente.

Variedade	Peso específico médio (g/cm³)
Puitá	0.60
424	0.60
Sinuelo	0.62
417	0.56
426	0.55

Os resultados da Tabela 1 demonstram a diferença de peso específico entre as variedades. A diferença de peso específico entre a variedade de maior valor, Sinuelo (peso específico de 0,62 g/m³), e a de menor, 417 (peso esp. de 0,56 g/m³), foi de 9,7 %. Divergindo a maior do valor proposto na NBR 6120 (1980) que é de 0,55 g/m³.

A Figura 4 mostra que a distribuição granulométrica foi pouco afetada pela diferença entre as variedades de grão. As linhas ficaram praticamente sobrepostas.

Já o ângulo de atrito foi influenciado pelo tipo de variedade de grão. O ângulo variou desde 34,54° para a variedade 417, chegando a 40,11° para a variedade Puitá. Uma diferença de 13,9 %. O valor proposto na NBR 6120 (1980) é único e igual a 36°.

Tabela 2 – Ângulo de Atrito em função da variedade.

Variedade	Ângulo de Atrito (Φ)
Puitá	40.11
Sinuelo	36.52
424	36.24
417	34.53
426	37.29

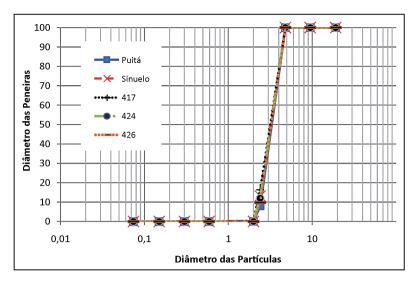


Figura 4 – Distribuição granulométrica dos grãos de arroz.

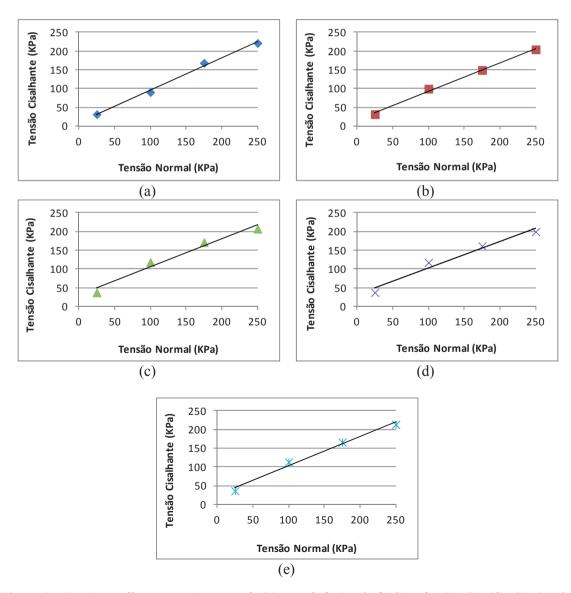


Figura 5 – Tensão cisalhante x tensão normal: (a) variedade Puitá, (b) Sinuelo, (c) 424, (d) 417, (e) 426.

A variação do peso específico aparente seco em função da pressão vertical exercida para as três variedades de grão ensaiadas é apresentada na Tabela 3. Na mesma tabela é calculada a variação entre o peso específico para pressão vertical nula e pressão vertical máxima.

Tabela 3 – Peso específico aparente seco em função da pressão vertical.

	Variedade do grão		
Pressões (kPa)	424	426	Puitá
0,00	0,60	0,55	0,60
31,8	0,61	0,57	0,61
63,7	0,62	0,58	0,62
95,5	0,63	0,59	0,63
127,3	0,63	0,59	0,63
Variação	6,06 %	7,65 %	5,75 %

Percebe-se que o peso específico aparente seco é dependente da pressão vertical exercida para todas as variedades de grão testadas, a menor variação observada foi para a variedade Puitá, com variação de 5,75 %, e a maior para a variedade 426, com 7,65 %.

As pressões horizontais atuantes na parede de um silo metálico circular com paredes corrugadas, foram calculadas de acordo com as Equações 1 e 2, usando o coeficiente de proporcionalidade K proposto por HARTMANN (1966) *apud* NASCIMENTO (2008) conforme Equação 3.

A Tabela 4 apresenta os valores de K obtidos usando a Equação 3.

Tabela 4 – Coeficiente K para as diferentes variedades de grão.

Variedade	K
Puitá	0,41
Sinuelo	0,48
424	0,48
417	0,51
426	0,46

Para o cálculo das pressões horizontais, o diâmetro adotado para o silo foi de 18,3 m (diâmetro comercial de 60 pés), e as duas alturas testadas foram de 18 e 22 m, resultando em razões altura/diâmetro de 0,98 e 1,20, respectivamente. As Figuras 6 e 7 apresentam os perfís de pressões horizontais obtidos. O perfil denominado NBR 6120 usou os parâmetros peso específico e ângulo de atrito propostos na norma, 0,55 g/cm³ e 36°, respectivamente.

Na Figura 6 percebe-se que as propriedades físicas das diferentes variedades de grão de arroz resultaram em perfis de pressão diferentes. A pressão calculada para a profundidade de 18 m para a variedade Puitá foi de 43,15 kN/m², enquanto que para a variedade Sinuelo foi de 53,23 kN/m². Uma diferença de 18,92 %. Já a diferença entre a pressão para a variedade Sinuelo e a NBR 6120 foi de 9,52 %.

Para a razão h/d = 1,20, a maior pressão horizontal observada foi para a variedade Sinuelo, chegando a um valor de 86,19 kN/m² para a profundidade de 22 metros. Já a menor pressão foi obtida para a variedade Puitá, com 76,73 kN/m², para a mesma profundidade. Uma diferença de 10,97 %. O perfil obtido para os valores propostos na NBR 6120 praticamente se sobrepôs ao da variedade Puitá, que apresentou as menores pressões.

A diferença entre as variações de pressões medidas para as diferentes razões h/d apresentadas nas Figuras 6 e 7 deve-se aos tipos de equações propostas por FREITAS e CALIL JUNIOR (2005). Na primeira a equação adotada foi linear, enquanto que na segunda, exponencial.

Como as equações para cálculo das pressões horizontais presentes nas normas internacionais dependem de diferentes abordagens e aproximações, os valores das pressões obtidas com emprego destas normas seria diferente. No entanto os perfis aqui traçados mostram que as variações nas propriedades físicas encontradas para as diferentes variedades de grão de arroz, resultam em variações significativas nas pressões horizontais nas paredes dos silos. Indicando a necessidade de maiores estudos a respeito.

4 Conclusões

Por meio dos resultados obtidos é possível notar que há diferença entre os valores de peso específico e ângulo de atrito interno para as variedades de arroz analisadas.

A variedade de arroz Puitá foi o que obteve o maior valor de ângulo de atrito interno, com valor igual há 40,11°, e a variedade 417 obteve o menor valor de ângulo de atrito interno com o valor de 34,53°, permanecendo os resultados das demais variedades nesse intervalo.

Não foi observada diferença na curva granulométrica para as diferentes variedades. A análise da influência da variedade sobre o formato do grão deve ser realizada por outro método mais sensível.

Avaliando-se a influência da pressão vertical sobre o peso específico aparente observou-se que o peso específico aumenta com o aumento da pressão.

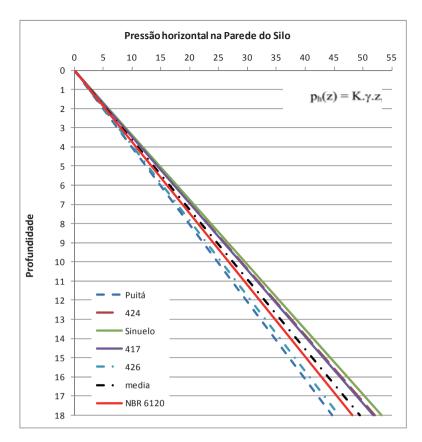


Figura 6 – Perfil de pressões calculado para as diferentes variedades de arroz para o silo com razão h/d = 0.98.

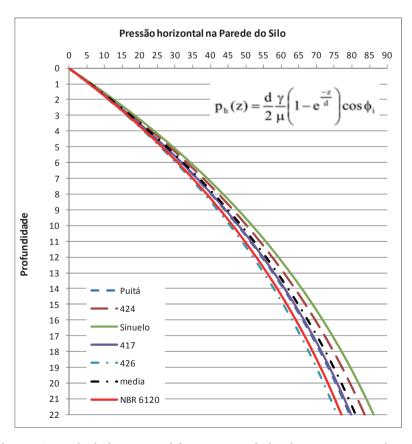


Figura 7 – Perfil de pressões calculado para as diferentes variedades de arroz para o silo com razão h/d = 1,20.

A variação depende da variedade do grão, sendo a menor variação de 5,75 % e a maior de 7,65 %.

As pressões horizontais calculadas pelas equações propostas por FREITAS e CALIL JUNIOR (2005) foram fortemente influenciadas pela variedade do grão. As maiores pressões foram obtidas para a variedade Sinuelo e as menores para a Puitá. Para a razão h/d = 0,98, a diferença entre as pressões calculadas para a profundidade de 18 m foi de 18,92 %. Já para a razão h/d de 1,20, a diferença para a profundidade de 22 m foi de 10,97 %.

As diferenças encontradas para as pressões calculadas para a variedade Sinuelo e as obtidas usando os parâmetros propostos na NBR 6120 (1980) foram de aproximadamente 10 % para as duas razões altura/diâmetro testadas.

Assim, percebe-se que a variedade do grão tem influência sobre os seus parâmetros físicos e mecânicos e, desta forma, pode influenciar no dimensionamento de silos ou outras estruturas de armazenagem. A não consideração dessa influência pode resultar em estruturas inseguras. Da mesma forma os valores propostos pela NBR 6120 (1980) são inferiores a praticamente todas as variedades de grão estudadas, sendo superiores apenas à variedade Puitá, sendo os valores propostos na norma contrários à segurança.

Por fim sugere-se a extensão deste estudo à outras variedades de grãos de arroz presentes no mercado nacional, além da validação dos resultados de ângulo de atrito pelo ensaio da célula de atrito de Jenike.

5 Referências

NBR 6120: Cargas para o Cálculo de Estruturas Metálicas. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1980.

NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1984.

NBR NM53: Agregado graúdo – Determinação do peso específico, peso específico aparente e absorção de água. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

ASTM 3080: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions aashto t236. American Society for Testing Material, 1990.

CALIL JÚNIOR, C. Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais. São Carlos, USP, 1990.

CALIL JUNIOR, C.; CHEUNG, A. B. Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo. São Carlos: EESC, 2007.

EMBRAPA, EMPRESA BRASILEIRA DE PES-QUISA AGROPECUÁRIA, 2004. Disponível em: http://www.embrapa.br>. Acesso em 12 de junho de 2013.

FAO, ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E PECUÁRIA, 2005. Disponível em: https://www.fao.org.br/>. Acesso em 12 de junho de 2013.

FREITAS, E. G. A.; CALIL JUNIOR, C. Estudo Teórico e Experimental das Pressões em Silos de Baixa Relação Altura/Diâmetro e Fundo Plano. Cadernos de Engenharia de Estruturas. Vol. 7, número 24. USP – São Carlos. 2005.

IRGA, INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. Disponível em: http://www.irga.rs.gov.br>. Acesso em 24 de fevereiro de 2015.

NASCIMENTO, F. C. A Relação entre as Pressões Horizontais e Verticais em Silos Elevados: O Parâmetro K. Dissertação de Mestrado. USP – São Carlos. 2008.

PLENTZ, CARLA SABRINE P. Obtenção de Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento de Grãos Produzidos na Região Sul do Brasil. Trabalho de conclusão de curso. UNIJUI, 2006.

T. W. LAMBE; R. V. WHITMAN, Soil Mechanics, SI version, Wiley, Prentice Hall, 1979.