

ANÁLISE DE ATRITO DE PAREDE DE MATERIAIS GRANULARES

Danielle Vitória Baia Rodrigues, danibaiaa@gmail.com¹
Hermeson Conceição Wanzeler, hermeson.wanzeler@tucurui.ufpa.br²
Danilo Silva Santos, daniLOSS@ufpa.br³

¹Universidade Federal do Pará (UFPA), Av. Brasília – Vila Permanente, Tucuruí – PA - CEP: 68455-901,

²Universidade Federal do Pará (UFPA), Av. Brasília – Vila Permanente, Tucuruí – PA - CEP: 68455-901,

³Universidade Federal do Pará (UFPA), Av. Brasília – Vila Permanente, Tucuruí – PA - CEP: 68455-901,

Resumo. *Materiais granulares podem ser definidos como um sistema separado que consiste em grupos de grãos individuais ou aglomerados, cujo tamanho pode variar de ordens de grandeza de alguns microns a milhares de metros. Eles são técnica e economicamente muito importantes em várias aplicações industriais. Este trabalho busca analisar o atrito de parede de materiais granulares, apresentando a metodologia e resultados dos serviços de caracterização de amostras de material a granel, especificamente do atrito interno do produto com a parede, visando fomentar a calibração de modelos numéricos para simulação computacional de escoamento de material granular. Os ensaios de obtenção do coeficiente de atrito com a parede com placa de Aço para os materiais foram realizados conforme a ABNT NBR 12957. Eles foram feitos nas umidades críticas de cada material. Por fim o estudo apresentou os valores obtidos de coeficiente de atrito do material com a parede, através do ensaio em mesa de cisalhamento, que faz parte dos processos de obtenção de dados para fazer a calibração de simulações.*

Palavras-chave: *Atrito de parede. Materiais granulares. Mesa de cisalhamento.*

Abstract *Granular materials can be defined as a separate system consisting of groups of individual grains or agglomerates, whose size can vary from orders of magnitude of a few microns to thousands of meters. They are technically and economically very important in many industrial applications. This paper seeks to analyze the wall friction of granular materials, presenting the methodology and results of the characterization services of bulk material samples, specifically the internal friction of the product with the wall, aiming to foster the calibration of numerical models for computational simulation of granular material flow. The tests to obtain the wall friction coefficient with a steel plate for the materials were performed according to ABNT NBR 12957. They were made at the critical moistures of each material. Finally, the study presented the values obtained for the coefficient of friction of the material with the wall, through the test on a shear table, which is part of the process of obtaining data to make the calibration of simulations.*

Keywords: *Wall friction. Granular materials. Shear table.*

1. INTRODUÇÃO

Materiais granulares podem ser definidos como um sistema separado que consiste em grupos de grãos individuais ou aglomerados, cujo tamanho pode variar de ordens de grandeza de alguns microns a milhares de metros (Hutter; Rajagopal, 1994), (Gennes, 1998), (Duran), 2012a). Os materiais granulares possuem formas e naturezas muito diversas e ocupam um lugar importante em nosso cotidiano (Silva, 2020). Eles são encontrados em toda parte na natureza, como minério, cascalho, areia, cereais em geral, como: arroz, açúcar, café e muitos outros (Chevoir, 2002), (Nedderman, 2005), (Andreotti; Forterre; Pouliquen, 2013).

Os materiais granulares são técnica e economicamente muito importantes em muitas aplicações industriais (Duran, 2012b). A tecnologia industrial utilizada no processamento de sistemas granulares envolve diversos processos. Portanto, as indústrias que lidam com materiais granulares como alimentos, construção civil, farmacêutica, agrícola, mineração e indústrias químicas precisam saber como manusear e armazenar esses materiais de forma eficiente e segura. (Rajchenbach, 2000), (Mehta, 2007).

De modo frequente, estes setores se deparam com variados tipos de meios granulares: pós finamente divididos, grãos secos ou úmidos com partículas das mais diversas formas provenientes de processos naturais ou industriais e falta de conhecimento suficiente sobre o comportamento mecânico granular, leva ao crescimento nos custos de manutenção e reparo de equipamentos, além de problemas causados por projetos inadequados, trabalho ineficiente ou mesmo dificuldades no armazenamento e transporte de materiais a granel (Carvalho et al., 2022). Assim, os mesmos autores afirmam que, do ponto de vista científico e industrial, é importante ter uma compreensão clara do comportamento dos materiais granulares para apoiar a otimização do processo para evitar custos desnecessários ou perdas futuras.

Considerando que o atrito interno do produto com a parede é uma das propriedades físicas cruciais para o desenvolvimento do projeto de fluxo de materiais granulares (Palma, 2005). Este trabalho busca analisar o atrito de parede de materiais granulares, apresentando a metodologia e resultados dos serviços de caracterização de amostras de material a granel, especificamente do atrito interno do produto com a parede, visando fomentar a calibração de modelos numéricos para simulação computacional de escoamento de material granular.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A dinâmica dos produtos sólidos armazenados é de grande importância nos processos industriais. À medida que aumenta o número e a variedade de produtos sólidos a serem armazenados, informações sobre suas propriedades são necessárias para manuseio e processamento. Considerando que a caracterização do produto granular consiste na determinação das propriedades de fluxo, e as características estão relacionadas ao comportamento do produto, resultando das forças que atuam sobre as partículas individuais. Determinar as propriedades físicas é relevante para definir a fluidez de um produto, já que as forças interparticulares influenciam seu padrão de escoamento (Palma, 2005).

As propriedades físicas mais importantes dos produtos definidos e utilizados no projeto do fluxo e estruturas de materiais granulares são: peso específico consolidado (γ); granulometria; teor de umidade (w); ângulo de atrito interno (ϕ_i); ângulo de atrito interno efetivo (ϕ_e); o ângulo de atrito interno do produto com a parede (ϕ_w) e a coesão (C) (Stasiak et al., 2015), (Calderón et al., 2017), (Malagalage et al., 2018). Neste trabalho, será apresentado o estudo do ângulo de atrito interno do produto com a parede (ϕ_w).

O ângulo de atrito da parede é uma medida do atrito entre as partículas e a parede, que depende da rugosidade, da forma e tamanho das partículas e da rugosidade da parede. Quanto maior a rugosidade da parede, maior o atrito que entra em contato com as partículas. Tomando a tangente do ângulo de atrito com a parede para corresponder ao coeficiente de atrito da parede (μ_w). A abordagem gráfica de Jenike (1964) analisando o ângulo de atrito com a parede permite determinar o ângulo de inclinação do funil cônico com a vertical, o produto do fluxo de massa e o coeficiente de fluxo do funil.

Marinelli e Carson (2001) apud a Naka (2010), relataram em seu trabalho que o fluxo do tipo massa afeta diretamente o ângulo de atrito entre o produto armazenado e a parede do silo. Muitos produtos aderem à superfície quando mantidos sob pressão por um período, resultando em maiores ângulos de atrito na parede, exigindo assim maiores inclinações.

O plano inclinado é um experimento físico comum para determinar o coeficiente de atrito entre dois materiais em contato. Segundo o trabalho de Souza et al. (2015), o plano inclinado é uma superfície inclinada que pode ser utilizada para estudar a relação entre o ângulo de inclinação e o coeficiente de atrito entre dois materiais. A força normal entre os materiais é reduzida à medida que o ângulo de inclinação aumenta, o que pode afetar o coeficiente de atrito entre eles.

Holdich (2002) apud a Naka (2010), estima em seu trabalho que a umidade pode, sob certas condições, promover o escoamento de produtos em pó armazenados em determinados silos, pois pode atuar como lubrificante ou impedir a geração de forças. a atração eletrostática entre as partículas reduz a coesão e o atrito interno e, assim, evita que o próprio fluxo se rompa. No entanto, segundo Palma (2005), a fluidez (fluidez) de alguns produtos armazenados, geralmente partículas finas (pequenas partículas abaixo de 100 μm), se deteriora com o aumento da umidade. O produto em que a dificuldade de drenagem devido ao aumento da umidade é perfeitamente perceptível é a areia.

Umidade crítica é um parâmetro usado para determinar a umidade limite na qual a emissão de poeira tende a permanecer constante. Analogamente, no campo da fluidização de partículas, a menor taxa de fluidização pode ser determinada para meios fluidizados, normalmente na ordem de duas a três vezes esse valor (Gupta et al, 2010).

3. MATERIAS E MÉTODOS

Foram estabelecidas três etapas de trabalho: revisão bibliográfica, ensaios para obtenção do coeficiente de atrito com a parede e conclusões com base nos resultados obtidos. O experimento foi conduzido no Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados (FluidPar) da Universidade Federal do Pará - Campus Tucuruí. Os materiais utilizados nos testes, foram: minério de ferro, a pelota, o coque e o carvão PCI (Pulverized coal injection).

Os ensaios de obtenção do coeficiente de atrito com a parede com placa de aço para os materiais foram realizados conforme a ABNT NBR 12957. Este método é usado para partículas de granulometria alta ($> 4,8\text{mm}$) que, devido a isso, impediriam o uso da célula de cisalhamento Jenike (método mais tradicional de obtenção de ângulo de atrito em massas granulares). Com o material estando em contato direto com uma chapa metálica, e acomodado em uma caixa de 300mm x 300mm de base com altura de, no mínimo, sete vezes o diâmetro da maior partícula. Foi realizado cargas sobre o

material equivalentes a 6 kPa, 5 kPa e 4 kPa para a umidade crítica (umidade com maior ângulo de repouso encontrado em ensaio). O teste de atrito é realizado em triplicata para cada carga usada, ou seja, serão 9 ensaios para cada material.

A rampa se inclina através da atuação de um cabo acionado por moto redutor e controlado por inversor de frequência a uma velocidade máxima de três graus por minuto. O momento em que a massa percorre o espaço de 50mm o ensaio é parado e o ângulo de escorregamento medido. Com base em cálculos específicos que correlacionam a força normal, a massa de material e a carga, obtém-se o coeficiente de atrito para as calibrações dos modelos para as umidades críticas de cada material. A Figura 1 apresenta o esquema da bancada, seguida da Figura 2 que mostra a bancada em funcionamento.

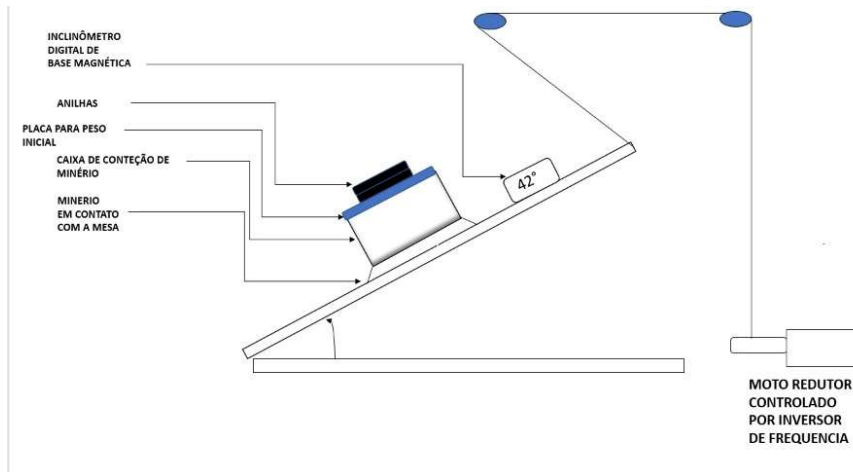


Figura 1. Esquema da bancada de atrito com parede - Shear Table (ABNT NBR 12957)

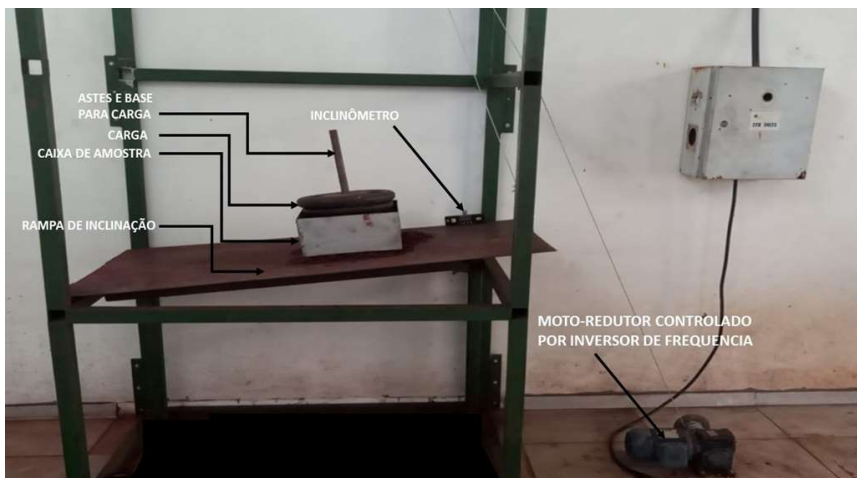


Figura 2. Bancada de atrito com parede - Shear Table (arquivo pessoal)

4. RESULTADOS

As Tabelas 1,2,3 e 4 apresentam os resultados dos ensaios de atrito com parede de cada material, obtidos via metodologia de plano inclinado com corpo de prova de massa granular. Os ensaios foram feitos nas umidades críticas indicadas no ensaio de ângulo de repouso para cada material obtidos em ensaios anteriores.

Tabela 1. Resultados dos ensaios de atrito de parede do Minério de Ferro Granulado.

MINÉRIO GRANULADO																
Massa Normal [kg]	Ângulos [°]			Ângulos [Radianos]			Tensão Normal [kPa]			Tensão Cisalhante [kPa]			Média tensão normal	Média Tensão Cisalhante	Ângulo de Atrito com a Parede [graus]	Coeficiente de atrito [-]
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3				
55,04	29,4	29,7	30,2	0,5131	0,5184	0,5271	5,2267	5,2112	5,1851	4,5832	4,6257	4,6963	5,2077	4,6350	38,5	0,79
45,87	27,9	27,8	27,2	0,4869	0,4852	0,4747	4,4187	4,4228	4,4469	3,9010	3,8881	3,8107	4,4295	3,8666		
36,69	27,5	26,4	26,9	0,4800	0,4608	0,4695	3,5473	3,5821	3,5665	3,3874	3,2619	3,3191	3,5653	3,3228		

Tabela 2. Resultados dos ensaios de atrito de parede da Pelota de Minério de Ferro.

PELOTA DE MINÉRIO DE FERRO																
Massa Normal [kg]	Ângulos [°]			Ângulos [Radianos]			Tensão Normal [kPa]			Tensão Cisalhante [kPa]			Média tensão normal	Média Tensão Cisalhante	Ângulo de Atrito com a Parede [graus]	Coeficiente de atrito [-]
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3				
55,04	23,5	23,85	23,12	0,4102	0,4163	0,4035	5,5018	5,4871	5,5175	3,7161	3,7683	3,6594	5,5021	3,7146	31,7	0,62
45,87	21,3	21,7	21,9	0,3718	0,3787	0,3822	4,6583	4,6455	4,6390	3,0222	3,0763	3,1032	4,6476	3,0673		
36,69	21,3	20,9	20,7	0,3718	0,3648	0,3613	3,7260	3,7361	3,7410	2,6588	2,6111	2,5872	3,7344	2,6190		

Tabela 3. Resultados dos ensaios de atrito de parede do Coque de Carvão.

COQUE DE CARVÃO																
Massa Normal [kg]	Ângulos [°]			Ângulos [Radianos]			Tensão Normal [kPa]			Tensão Cisalhante [kPa]			Média tensão normal	Média Tensão Cisalhante	Ângulo de Atrito com a Parede [graus]	Coeficiente de atrito [-]
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3				
55,04	21,8	22	22,3	0,3805	0,3840	0,3892	5,5703	5,5625	5,5507	2,8764	2,9015	2,9391	5,5612	2,9057	29,5	0,56
45,87	20,3	20,7	21,1	0,3543	0,3613	0,3683	4,6893	4,6771	4,6646	2,3404	2,3845	2,4285	4,6770	2,3845		
36,69	19,1	19,8	18,9	0,3334	0,3456	0,3299	3,7790	3,7628	3,7836	1,8800	1,9462	1,8610	3,7751	1,8957		

Tabela 4. Resultados dos ensaios de atrito de parede do Carvão PCI.

CARVÃO PCI																
Massa Normal [kg]	Ângulos [°]			Ângulos [Radianos]			Tensão Normal [kPa]			Tensão Cisalhante [kPa]			Média tensão normal	Média Tensão Cisalhante	Ângulo de Atrito com a Parede [graus]	Coeficiente de atrito [-]
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3				
55,04	26,8	26,1	26,3	0,4677	0,4555	0,4590	5,3549	5,3876	5,3783	3,4923	3,4076	3,4318	5,3736	3,4439	31,3	0,61
45,87	25,9	25,15	25,8	0,4520	0,4390	0,4503	4,4976	4,5258	4,5014	2,9467	2,8670	2,9361	4,5083	2,9166		
36,69	24,15	24,8	24,7	0,4215	0,4328	0,4311	3,6492	3,6304	3,6333	2,3506	2,4099	2,4008	3,6376	2,3871		

A Figura 3 apresenta os gráficos com os ângulos e coeficientes de atrito de cada material nas suas umidades críticas.

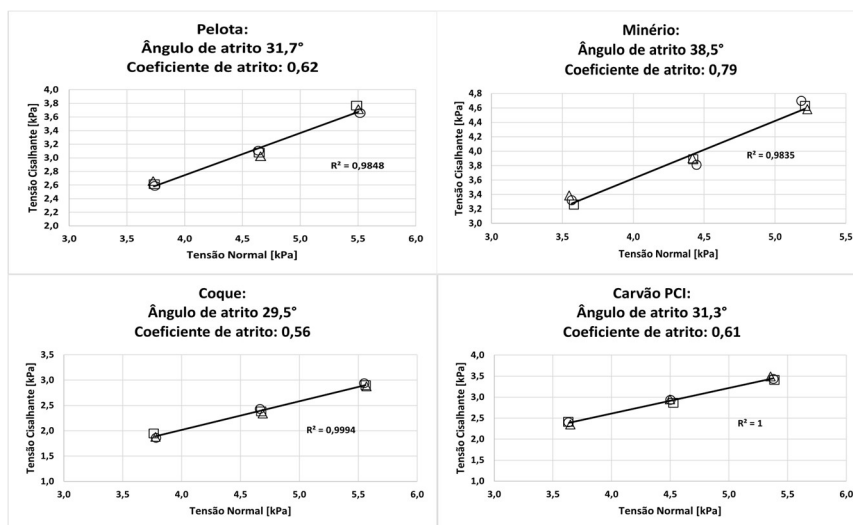


Figura 3. Ângulos e coeficientes de atrito de cada material nas suas respectivas umidades críticas

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ângulo de atrito interno do produto com a parede é um dos parâmetros necessários para a determinação de fluxo dos materiais granulares. Deste modo, o presente estudo apresentou, os valores obtidos de coeficiente de atrito do material com a parede, através do ensaio em mesa de cisalhamento, que faz parte dos processos de obtenção de dados para fazer a calibração de simulações.

6. REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 12957 Geossintéticos — Determinação das características de atrito Parte 2: Ensaio de plano inclinado, 2013.
 ANDREOTTI, B.; FORTERRE, Y.; POULIQUEN, O. Granular media: between fluid and solid. [S.l.]: Cambridge University Press, 2013.

- CALDERÓN, C. A., OLIVARES, M. C. V., UÑAC, R. O. & VIDALES, A. M. (2017). Correlations between flow rate parameters and the shape of the grains in a silo discharge. *Powder Technology*, 320: 43-50.
- CARVALHO, L. C. da S. .; GOMES, L. M. .; CASTRO, M. M. .; SANTOS, D. S. .; MESQUITA, A. L. A. .; MESQUITA, A. L. A. .; FONTANA, A. dos R. L. . Análise de modelos de coesão capilar para a simulação numérica de escoamento de granulados : Analysis of capillary cohesion models for the numerical simulation of granulates flow. *Latin American Journal of Development*, [S. l.], v. 4, n. 3, p. 1322–1343, 2022.
- DURAN, J. Sands, powders, and grains: an introduction to the physics of granular materials. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- GENNES, P. D. Reflections on the mechanics of granular matter. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 261, n. 3-4, p. 267–293, 1998.
- GUPTA, C.K., AGRAWAL, V.K., MILLS, D., A model for fluidized motion conveyor transporting fly ash, *Experimental Thermal and Fluid Science*, v.34, p.1042–1048, 2010.
- HUTTER, K.; RAJAGOPAL, K. On flows of granular materials. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, Springer, v. 6, n. 2, p. 81–139, 1994.
- JENIKE, A. W. Storage and flow of solids. Salt Lake City, University of Utah. 1964.(Bulletin. Utah Engineering Experiment Station, nº123).
- MALAGALAGE, A., RATNAYAKE, C., SAASEN, A., THOMASSEN, T. & VON-HAFENBRÄDL, F. O. (2018). Flow properties of drill cuttings with varying drilling fluid content using jenike shear testing. *Chemical Engineering & Technology*, 41(8): 1544-1550.
- MEHTA, A. Granular physics. [S.l.]: Cambridge University Press, 2007.
- NAKA, S. Determinação das propriedades físicas dos grãos de mamona ‘guarani’ visando armazenagem em silos verticais. Universidade Estadual de Campinas – SP, 2010.
- NEDDERMAN, R. M. Statics and kinematics of granular materials. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.
- PALMA, G. Pressões e fluxo em silos esbeltos ($h/d > 1,5$). Escola de Engenharia de São Carlos. USP, São Carlos, 2005.
- POULIQUEN, O.; CHEVOIR, F. Dense flows of dry granular material. *Comptes Rendus Physique*, Elsevier, v. 3, n. 2, p. 163–175, 2002.
- RAJCHENBACH, J. Granular flows. *Advances in physics*, Taylor & Francis, v. 49, n. 2, p. 229–256, 2000.
- SILVA, L. O., Reologia $\mu(I)$ em escoamentos granulares por método de elementos discretos / Letícia Oliveira Silva. – 2020.
- SOUZA, D. F. et al. Estudo do coeficiente de atrito cinético entre diferentes materiais utilizando o plano inclinado. *Revista Virtual de Química*, v. 7, n. 1, p. 226-238, 2015.
- STASIAK, M., MOLEND, M., BANDA, M. & GONDEK, E. (2015). Mechanical properties of sawdust and woodchips. *Fuel*, 159: 900-908.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.