



ANGLER - UM APARATO PARA DETERMINAÇÃO DE ÂNGULO DE REPOUSO

TEIXEIRA, J.R.T.¹, LEITE, J.Y.P.¹, ARAÚJO, F.S.D.²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Laboratório de Processamento Mineral. E-mail: joserodolpho1915@gmail.com

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá (IFAP).

RESUMO

O ângulo de repouso é um parâmetro muito empregado em diversos setores, principalmente na engenharia agrícola, entomologia, engenharia geotécnica, hidrodinâmica e sedimentologia, tecnologia de partículas e ciência dos materiais. Diversos fatores intrínsecos e extrínsecos ao material afetam este valor, como o ângulo de fricção interno, ângulo de fricção interfacial, estratificação, rugosidade da base na qual o material é empilhado, segregação, massa do material, altura da alimentação para formação da pilha, morfologia, bem como a presença de óleos e solventes, umidade, pressão de compactação, e forma de empilhamento. Neste trabalho foi desenvolvido um aparato denominado ANGLER para determinação do ângulo de repouso, sendo conduzidos ensaios com feldspato, quartzo, calcita, rejeito de cromita e areia de praia. Também foram medidos o percentual de umidade e densidade aparente do material, buscando correlacioná-los. Os resultados obtidos para o ângulo de repouso são condizentes com a literatura, mas não foi possível correlacioná-la com o percentual de umidade, pois as amostras apresentaram baixa umidade. Os valores de densidade aparente seguiram a tendência de reduzir à medida que a granulometria do material diminui.

PALAVRAS-CHAVE: ANGLER, Ângulo de Repouso, Aparato

ABSTRACT

Repose angle is a parameter employed in many industrial sectors, mainly agricultural engineering, entomology, geotechnical engineering, hydrodynamics and sedimentology, particle technology and materials science. Many intrinsic and extrinsically material factors affect these values, as internal friction angle, interfacial friction angle, stratification, roughness of the base where material is piled up, segregation, material mass, feed height for pile formation, morphology, presence of oils and solvents, moisture, compression pressure as well the way the pile is formed. In this work an apparatus named ANGLER was developed to determination of repose angle, with tests performed with feldspar, quartz, calcite, chromite tailing and sand beach. The moisture percentual and apparent density also were determined, trying correlated them. The obtained results of repose angle are compatible with literature but was not possible correlate these results with moisture content, due the low amount on samples. The apparent density values follow the tendency to reduce as the size reduce.

KEYWORDS: ANGLER, Repose Angle, Apparatus

1. INTRODUÇÃO

Embora o conceito de ângulo de repouso seja mais antigo, a definição mais utilizada foi proposta por Mehta e Barker (1994), que definiram o ângulo de repouso estático como o ângulo mais acentuado que um material não confinado pode ser empilhado sem que haja desmoronamento.

As principais aplicações do ângulo de repouso, reportadas por Al-Hashemi e Al-Amoudi (2018), são na engenharia agrícola, entomologia, engenharia geotécnica, hidrodinâmica e sedimentologia, tecnologia de partículas e ciência dos materiais.

Dentre algumas utilizações do ângulo de repouso na indústria mineral, é possível citar o dimensionamento de silos e moegas, determinação da capacidade de estocagem e transporte de minério, estabilidade de taludes, determinação de altura e área ocupada por pilhas de lixiviação.

Para ilustrar a importância do ângulo de repouso na mineração, Will e Napier-Munn (2006) dizem que no projeto de uma pilha de estocagem só é necessário conhecer o ângulo de repouso do minério, o volume ocupado pelo minério fragmentado e sua tonelagem.

Gomide (1983) alerta para o fato de que o ângulo de repouso não depende exclusivamente da natureza do material, sofrendo também influências da umidade, pressão de compactação, bem como da forma de empilhamento.

Al-Hashemi e Al-Amoudi (2018), apontam para inúmeros outros fatores, intrínsecos e extrínsecos ao material, que podem afetar o ângulo de repouso, como o ângulo de fricção interna, ângulo de fricção interfacial, estratificação, rugosidade da base na qual o material é empilhado, segregação, massa do material, altura da alimentação para formação da pilha, morfologia, bem como a presença de óleos e solventes.

De acordo com Wei *et al.* (2019), o ângulo de repouso pode ser obtido por simulação ou cálculo direto através de experimentos, embora neste último caso, a opacidade da pilha, descontinuidade e aleatoriedade das partículas possam gerar dificuldades para os estudos relacionados à estrutura interna.

Khanal *et al.* (2017) realizaram um estudo utilizando elementos discretos para determinação do ângulo de repouso em função da esfericidade das partículas, concluindo que no modelamento, partículas com menor esfericidade produzem resultados mais próximos dos experimentais.

Li *at al.* (2017) realizaram simulações com grânulos de minério de ferro, relacionando, dentre outros fatores, a influência do tamanho das partículas no ângulo de repouso.

Os métodos experimentais mais comuns para determinação do ângulo de repouso envolvem a formação de uma pilha que, segundo Al-Hashemi e Al-Amoudi (2018), pode ser formada por uma caixa basculante, método do funil fixo e método do cilindro.

Segundo Wójcik *et al.* (2018), a formação do cone, dependendo do equipamento, pode ser feita pelos métodos de esvaziamento, empilhamento, submersão, aspergimento, com aeração e rotação.

Utilizando o método da pilha, o ângulo de repouso pode ser determinado pela Equação 1.

$$\sigma_e = \arctan \frac{2h}{b} \quad (1)$$

Onde “h” é a altura do cone, medido da base ao topo e “b” é a base do cone.

O ângulo de repouso dinâmico (σ_d) ou ângulo de transporte, é uma propriedade derivada do ângulo de repouso (σ_e), sendo uma estimativa, obtida a partir da Equação 2.

$$\sigma_d = 0,7 \cdot \sigma_e \quad (2)$$

O ângulo de repouso estático pode ser utilizado, por exemplo, para o dimensionamento de correias transportadoras, sendo dessa forma, de suma importância a determinação deste parâmetro.

Considerando a importância da determinação do ângulo de repouso na área mineral e a pouca disseminação da prática de confecção de aparelhos, neste trabalho foi confeccionado um aparato didático, em madeira e vidro, com abertura para introdução do material, denominado "ANGLER".

Para aferição do equipamento foram utilizados cinco materiais: feldspato, quartzo, calcita, rejeito de cromita e areia de praia, sendo determinadas também a umidade e densidade aparente do material.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 1.

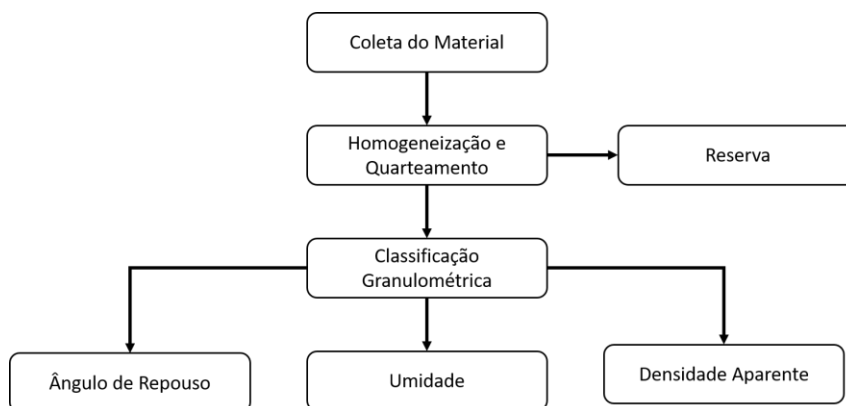


Figura 1. Fluxograma das etapas desenvolvidas na execução do trabalho.

Dos cinco materiais utilizados, o feldspato, quartzo e calcita estavam disponíveis no laboratório. O rejeito de cromita e areia de praia foram coletados *in loco*, na pilha de rejeito de uma mina e em uma praia potiguar respectivamente.

Após a coleta, os materiais foram homogeneizados e quarteados.

Parte do material foi reservado a outra seguiu para classificação granulométrica, sendo utilizadas nas análises apenas as seguintes frações: -2mm +1,19mm; -1,19mm +0,59mm; e -0,59mm +0,297mm. Os ensaios realizados com o rejeito de cromita e areia de praia empregou apenas a fração +2mm. A classificação foi realizada com o objetivo de uniformizar o tamanho dos grãos e minimizar os fatores de estratificação e segregação durante a formação das pilhas.

A Figura 2 apresenta o ANGLER, equipamento desenvolvido no Laboratório de Processamento Mineral.



Figura 2. Equipamento para determinação de ângulo de repouso de materiais particulados ANGLER.

O material é introduzido no aparato pela abertura superior, através do funil, e acomoda-se formando uma pilha no formato de um triângulo. Com o auxílio de uma régua é possível medir a base e a altura, calculando o ângulo de repouso de acordo com a Equação 3.

$$\sigma_e = \arctan \frac{h}{b} \quad (3)$$

Como a medida não mais é realizada em uma pilha cônica, não é mais necessário utilizar a metade da base, simplificando a equação.

A determinação do percentual de umidade e densidade aparente foram feitas de acordo com os procedimentos descritos por Sampaio e Silva (2007).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de ângulo de repouso para os materiais estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Ângulo de repouso obtido no Angler dos materiais estudados.

Faixa Granulométrica	σ_e Feldspato	σ_e Quartzo	σ_e Calcita	σ_e Rejeito de Cromita	σ_e Areia de Praia
+2,000mm	-	-	-	33°	30°
-2,000mm +1,190mm	28°	31°	31°	-	-
-1,190mm +0,590mm	29°	30°	31°	-	-
-0,590mm +0,297mm	32°	27°	34°	-	-

Os resultados obtidos para todos os materiais nas diferentes faixas granulométricas, apresentaram pequenas variações, próximos dos valores típicos para areias reportados por Al-Hashemi e Al-Amoudi (2018), que varia entre 15° a 45° dependendo da umidade.

Para melhor representar o comportamento dos ângulos de repouso em função das faixas granulométricas, os dados foram plotados nos gráficos apresentados na Figura 3.

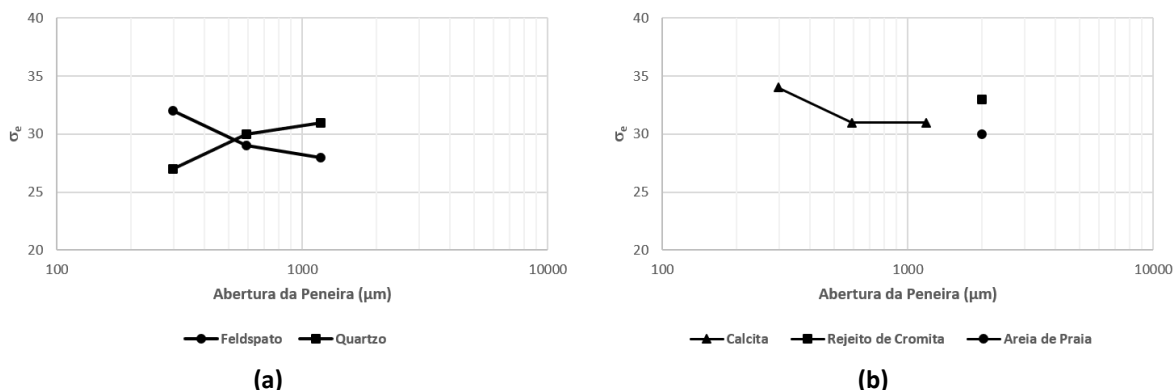


Figura 3. (a) Gráfico do ângulo de repouso para o feldspato e quartzo e (b) calcita, rejeito de cromita e areia de praia em função da distribuição de tamanho.

O feldspato e a calcita apresentaram um comportamento esperado, de acordo com Li *et al.* (2017), com o ângulo de repouso aumentando à medida que o tamanho das partículas diminui, contudo, o ângulo de repouso do quartzo diminuiu com a diminuição do tamanho das partículas, o que pode estar associado a diversos fatores, dentre eles, a esfericidade das partículas de quartzo, um fato que precisa ser confirmado com análises microscópicas.

As amostras de rejeito de cromita e areia de praia estão dentro dos valores para solo e areia.

A Tabela 2 apresenta os resultados de umidade e densidade aparente para as amostras ensaiadas.

Tabela 2. Resultados obtidos para os minerais ensaiados.

FELDSPATO		
Faixa Granulométrica	% Umidade	Densidade Aparente
-2,000mm +1,190mm	0,21	1,40
-1,190mm +0,590mm	0,04	1,46
-0,590mm +0,297mm	0,06	1,28
QUARTZO		
Faixa Granulométrica	% Umidade	Densidade Aparente
-2,000mm +1,190mm	0	1,54
-1,190mm +0,590mm	0	1,53
-0,590mm +0,297mm	0	1,48
CALCITA		
Faixa Granulométrica	% Umidade	Densidade Aparente
-2,000mm +1,190mm	0	1,62
-1,190mm +0,590mm	0	1,51
-0,590mm +0,297mm	0	1,06
+ 2mm		
Rejeito de cromita	0,95	1,73
Areia de praia	1,89	1,60

Os valores obtidos nas determinações do percentual de umidade foram muito baixos, de forma que não foi possível correlacionar os efeitos da umidade com o ângulo de repouso, sendo necessário, portanto, realizar mais ensaios, controlando os níveis de umidade para tentar correlacionar estes parâmetros.

De forma geral, a densidade aparente se comportou como esperado, reduzindo com a redução do tamanho das partículas.

4. CONCLUSÕES

Os resultados preliminares obtidos no ANGLER são condizentes com os resultados obtidos na literatura para materiais similares.

Não foi possível correlacionar a influência da umidade das amostras no ângulo de repouso, fato que se deu em virtude da baixa umidade das amostras, contudo, foi possível verificar a tendência de redução da densidade aparente.

Futuros estudos deverão ser realizados variando a umidade das amostras e correlacionando este parâmetro ao ângulo de repouso.

O desenvolvimento do projeto e a construção do ANGLER, associados ao seu baixo custo e aos bons resultados obtidos, fizeram desta, uma prática exitosa, com bons resultados do ponto de vista didático, bem como para determinações rápidas *in loco*.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de deixar seu especial agradecimento ao Professor José Yvan Pereira Leite (*In Memoriam*), que dedicou a sua vida a transformar vidas. Seus orientandos seguirão o seu exemplo, transformando vidas e acreditando sempre no potencial da nossa juventude.

6. REFERÊNCIAS

- Al-Hashemi H.M.B., Al-Amoudi O.S.B. **A review on the angle of repose of granular materials**. Powder Technology 2018; 330; 397-417.
- Gomide R. **Operações unitárias**. São Paulo: R.Gomide, 1983.
- Khanal M., Elmoultie M., Adhikary D. **Effects of particle shapes to achieve angle of repose and force displacement behaviour on granular assembly**. Advanced Powder Technology 2017; 28; 1972-1976.
- Li C., Honeyands T., O’Dea D., Moreno-Atanasio R. **The angle of repose and size segregation of iron ore granules: DEM analysis and experimental investigation**. Powder Technology 2017; 320; 257-272.
- Mehta, A., Barker, G.C. **The dynamics of sand**, reports, Prog. Phys. 1994; 57; 383–416.
- Sampaio J.A., Silva F.A.N.G. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. Capítulo 2, Determinação das densidades de sólido e polpa, p. 37-51.
- Wei H., Tang X., Ge Y., Li M., Sáxen H., Yu Y. **Numerical and experimental studies of the effect of iron ore particle shape on repose angle and porosity of a heap**. Powder Technology 2019; 353; 526-534.
- Wills B.A., Napier-Munn T. **Mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. Elsevier Science and Technology Books, 2006.
- Wójcik A, Klapa P, Mitka B, Sladek J. **The use of photogrammetric method for measurement of the repose angle of granular materials**. Measurement 2018; 115; 19-26.