

Análise do Sistema de Medição do Ângulo de Repouso em Fertilizantes de Diferentes Granulometrias.

Rogério Santana Peruchi (UFG) rogeriooperuchi@gmail.com
Isabel Santana Borges Ferreira (UFG) isabelengenharia@gmail.com
Nilson José Fernandes (UFG) nilsonjf10@gmail.com
Graziella Ramos da Silva Lima (UNIUBE) grazilimma@hotmail.com
Deivid Marques Nunes (UFG), deivid_ep@hotmail.com

Resumo:

Na indústria de fertilizantes o projeto adequado dos equipamentos de armazenagem e o manuseio corretos das partículas, dependem do conhecimento do ângulo de repouso do material, e muitas vezes esse conhecimento, constitui a diferença entre o sucesso e o fracasso de determinada operação. Devido sua importância, existem diferentes métodos para determinação do ângulo de repouso na literatura, porém cada método produz valores um pouco diferentes não padronizados e não consistentes. Diante disso, esse projeto de pesquisa realizou um experimento em dois diferentes métodos aplicando o estudo de repetitividade e reprodutividade com o objetivo de analisar a variabilidade do processo de medição e comparar o erro de medição existente entre os métodos de medição do ângulo de repouso. Para as análises foram selecionados 03 operadores e separados 10 amostras que continham diferentes granulometrias de fertilizantes. Com a aplicação do estudo foi possível identificar através do índice de classificação do sistema de medição obtido que o aparato 02 apresentou uma menor variação em relação ao aparato 01. Sendo que o aparato 01 foi classificado como inaceitável, pois não atendeu aos critérios de aceitação mínimos para um sistema de medição confiável.

Palavras chave: Repetitividade, Reprodutividade, Ângulo de Repouso e Fertilizantes.

Analysis of the Angle Resting System in Fertilizers of Different Granulometries

Abstract

In the fertilizer industry proper design of the storage equipment and correct handling of the particles depends on the knowledge of the angle of repose of the material, and often this knowledge is the difference between success and failure of a given operation. Because of their importance, there are different methods for determining the angle of repose in the literature, but each method produces slightly different values that are not standardized and non-consistent. Therefore, this research project conducted an experiment in two different methods applying the study of repeatability and reproducibility with the objective of analyzing the variability of the measurement process and comparing the measurement error between the methods of measurement of the angle of repose. For the analyzes, 03 operators were selected and 10 samples containing different fertilizer granulometry were separated. With the application of the study it was possible to identify through the classification index of the measurement system obtained that the apparatus 02 presented a smaller variation in relation to the apparatus 01. Since the apparatus 01 was classified as unacceptable, since it did not meet the minimum acceptance criteria for a reliable measuring system.

Key-words: Repeatability, Reproducibility, Angle of Rest and Fertilizers

1. Introdução

Materiais granulares são de importância substancial em muitos processos industriais e naturais, mas seus comportamentos complexos, ainda são pouco compreendidos (RICHARD et al., 2005). Os desafios de manuseio de materiais granulares surgem quando os materiais são agitados, pois eles não se comportam como materiais estáveis e sólidos (KOU et al., 2017). Além disso, a distribuição de tensões em materiais granulares não é uniformemente distribuída ao longo das cadeias de força (PETERS et al., 2005), as quais dependem dos contatos de partículas e arranjo de empacotamento para se estabilizar.

A fluidez desses materiais granulares depende de um conjunto de parâmetros, um dos principais é o ângulo de repouso (SCHULZE, 1996). O ângulo de repouso é fisicamente definido como a inclinação medida na base de uma pilha de sólidos granulares, não compactados, após o escoamento (SCHULZE, 2007).

No setor da indústria de fertilizantes o ângulo de repouso de materiais granulares tem sido amplamente estudado, pois é um parâmetro macroscópico muito importante na caracterização da fluidez desses materiais (ZHIGUO et al., 2013). O ângulo de repouso é necessário para considerar a capacidade de armazenamento e a concepção de tremonhas, calhas, transportadores e telhados inclinados de edifícios para armazenamento a granel.

A revisão da literatura indica que o ângulo de repouso pode ser utilizando também em diferentes outros campos, como na agricultura (para a concepção de silos), farmacologia (na determinação de produção de droga e fluidez), geologia (para a avaliação e monitoramento de dunas de areia e formações granulares), manuseio de materiais a granel, mineração, engenharia civil e calibração de modelos numéricos (HAMZAH E OMAR, 2018).

O ângulo de repouso dos fertilizantes é influenciado principalmente pela forma da partícula, tamanho e textura da superfície (KLUWER, 1998). Quando não levado em consideração poderá gerar impacto diretamente na segurança e nos custos dos projetos. Devido sua importância, existem diferentes métodos para determinação do ângulo de repouso. Hamzah e Omar (2018) citam 06 (seis) diferentes métodos para determinar o ângulo de repouso fisicamente: (1) método de caixa basculante, (2) método de funil fixo, (3) método de cilindro / tambor giratório, (4) método do cilindro oco, (5) método do cilindro basculante e (6) método da comparação. Mesmo existindo diferentes métodos e diretrizes disponíveis na literatura, esses métodos não são padronizados e não são consistentes (RACKL, et al., 2017).

Diante desse contexto a análise do sistema de medição (MSA - Measurement System Analysis) é uma das mais importantes ferramentas de qualidade utilizadas para avaliar a adequação da variação do medidor, a fim de garantir a qualidade do sistema de medição e produtos relacionados (SAIKA EW, 2018). O objetivo principal do MSA é minimizar a medição erros, portanto, é crucial identificar as fontes de desvio que podem afetar os resultados produzido pelo sistema. Montgomery e Runger (2003) afirmam que um SM (sistema de medição) confiável é essencial para assegurar a avaliação do desempenho de um produto ou processo, tendo sua capacidade como requisito básico para a melhoria da qualidade. A capacidade de um SM vai além da calibração, Burdick, Borror e Montgomery (2003) relatam que a capacidade do sistema de medição deve ser avaliada através de estudos de linearidade, repetitividade e reprodutividade.

O estudo de repetitividade e reprodutividade é um estudo sobre a variabilidade observada em uma medição (ZANOBINI et al., 2016). É um método para se estimar a variabilidade associada ao sistema de medição. Este método busca mensurar os elementos de variação de um sistema

de medição, determinando se essa variabilidade é menos significativa que a apresentada no processo (AL-REFAIE e BATA, 2010; PERUCHI, 2014).

Nesse estudo, o instrumento de medição e os avaliadores são utilizados para medir repetidas vezes as amostras de um produto. A repetitividade é a variação nas medições obtidas com um instrumento de medição quando usado diversas vezes por um avaliador que mede a mesma característica em uma mesma peça. A reprodutividade é tipicamente definida como a variação na média das medições feitas por diferentes avaliadores usando o mesmo instrumento de medição para medir a mesma característica em uma mesma peça (AL-REFAIE e BATA, 2010; BURDICK, BORROR e MONTGOMERY, 2003; MAJESKE, 2008).

Diante disso, esse artigo aplica o estudo de repetitividade e reprodutividade com o objetivo de analisar a variabilidade do processo de medição e comparar o erro de medição existente entre alguns dos possíveis métodos de medição do ângulo de repouso.

O método escolhido para realização dos experimentos foi o método do funil fixo, onde foram construídos dois aparatos com características diferentes para se realizar a comparação da efetividade do sistema de medição. Nesse método os materiais granulares são vazados de um funil a uma certa altura sobre uma base selecionada. O vazamento do material é interrompido quando a pilha atinge uma altura ou largura predeterminada. Então, o ângulo de repouso é medido pela regra da tangente inversa (arctan) (HAMZAH e OMAR, 2018).

Durante o planejamento do experimento foi determinado a quantidade de três (03) operadores para realizarem as análises e foram utilizadas amostras de fertilizantes com três granulometrias diferentes, classificadas em: fina, intermediária e grossa. Para a realização dos testes foram separadas 10 amostras contendo composições misturadas dessas 03 classificações de granulometrias.

Esta validação do sistema de medição entre os diferentes aparatos utilizando o método do funil fixo, será importante para o pesquisador poder afirmar com maior convicção se os resultados obtidos no estudo, realmente são efeitos das alterações dos níveis dos fatores do experimento ou são apenas variações do sistema de medição. Embora a medição do ângulo de repouso seja bastante simples, pequenas diferenças nas condições da amostra ou do método de medição pode levar a resultados errados (HAMZAH e OMAR, 2018) causando grandes impactos físicos e financeiros. Caso o sistema de medição seja validado, tal método poderá ser usado em diversas indústrias de fertilizantes para determinação precisa do ângulo de repouso.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Estudo de Repetitividade e Reprodutividade com Arranjos Aninhados

Dentro de estudos de GR&R, quando os níveis de um fator são semelhantes, mas não exatamente os mesmos níveis do outro fator, o arranjo é chamado aninhado (nested) (MAJESKE, 2012). Nesse arranjo de estudo aninhado, cada peça é exclusiva do operador; dois operadores nunca medem a mesma peça, pois não há termo de interação entre os dois fatores e o modelo ANOVA podem ser escritos da seguinte forma (AL-REFAIE e BATA, 2010; BURDICK, BORROR e MONTGOMERY, 2003):

$$Y_{ijk} = \mu_y + \beta_j + \alpha(\beta)_{i(j)} + \varepsilon_{ijk} \quad \forall i = 1, \dots, p; j = 1, \dots, o; k = 1, \dots, r \quad (1)$$

Na equação (1) é a variável de resposta medida; μ é a média de valores medidos; α e β são variáveis aleatórias e independentes, que representam a variação das peças aninhadas por operador e ε representa o termo de erro. As letras "p", "o" e "r" representam as quantidades de

peças, operadores e réplicas, respectivamente. Mais detalhes sobre como estimar os componentes de variância da Eq. (1), ver Burdick, Borror e Montgomery (2003) e Aquila, et al. (2018). Os componentes de variância na Eq. (1) podem ser traduzidos em notação NGR&R, conforme observado a seguir (BURDICK, BORROR e MONTGOMERY, 2003):

$$\sigma_{process}^2 = \sigma_{\alpha(\beta)}^2, \sigma_{repeatability}^2 = \sigma_{\varepsilon}^2, \sigma_{reproducibility}^2 = \sigma_{\beta}^2$$
$$\sigma_{NGR\&R}^2 = \sigma_{repeatability}^2 + \sigma_{reproducibility}^2 \quad \sigma_{total}^2 = \sigma_{process}^2 + \sigma_{NGR\&R}^2 \quad (2)$$

Após o cálculo da variância por meio da ANOVA aninhada, a fim de avaliar se o sistema de medição é aceitável ou não, a razão de cálculo entre o desvio padrão de NGR&R e o desvio padrão da variação total deve ser realizado. Eq. (3) representa o índice utilizado para avaliar o sistema de medição.

$$\%NG \& R = \left(\frac{\sigma_{NG\&R}}{\sigma_{total}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

Se o índice demonstrar um resultado abaixo de 1%, o sistema de medição é considerado aceitável, se o resultado estiver entre 1% e 9%, o sistema de medição é considerado marginal (dependendo da aplicação é aceitável), e para resultados acima de 9%, a medição sistema é considerado inaceitável (AIAG, 2010).

3. Metodologia

Burdick, Borror e Montgomery (2005) recomenda que para a concepção bem sucedida de uma experiência, durante o processo de experimentação deve haver um planejamento da sequência de atividades. O método dessa pesquisa foi adaptado de Burdick, Borror e Montgomery (2005) e está descrito nos seguintes passos abaixo:

- **Passo 01:** consiste na declaração do problema, onde é identificado o ponto em que é necessário a aplicação do planejamento de experimentos. Essa identificação se dá por meio da participação de uma equipe multidisciplinar.
- **Passo 02:** é definido pela definição da variável de resposta, onde deve ser realizado com atenção de maneira a evitar erros operacionais de medição, para que se obtenham informações úteis sobre o processo de estudo.
- **Passo 03:** definição das variáveis de controle e seus níveis, a partir das informações levantadas deve-se definir os fatores que causam variação no objeto de estudo, o intervalo em que esse fator irá variar e os níveis de variação.
- **Passo 04:** escolha do arranjo experimental, onde a partir dos dados definidos, verifica-se qual técnica mais se adequa ao caso.
- **Passo 05:** realização dos experimentos, onde o experimento é executado e deve-se monitorá-lo cuidadosamente, de maneira a certificar-se que, o que foi proposto no planejamento está sendo seguido.
- **Passo 06:** realização da análise estatística dos dados, onde métodos estatísticos devem ser usados para analisar os dados. O passo 6 foi subdividido em subfases (A, B, C e D) para melhor explicação de como devem ser conduzidas as análises estatísticas:

(A) Avaliar o índice de classificação do sistema de medição

Para realiza essa avaliação utilizar a equação 10 citada na fundamentação teórica. Se o índice

demonstrar um resultado abaixo de 1%, a mensuração sistema é considerado aceitável, se o resultado estiver entre 1% e 9%, o sistema de medição é considerado marginal (dependendo da aplicação é aceitável), e para resultados acima de 9%, a medição sistema é considerado inaceitável.

(B) Avaliar análise de variância (ANOVA)

A análise de variância procura diferenças entre médias de grupos. Quando as médias são bem diferentes, existe um alto grau de variação entre as condições. Se não existirem diferenças entre as médias dos grupos, não existe variação. As variações entre grupos surgem como efeito de tratamentos ou experimentos, diferenças individuais e erro experimental. Para realizar a avaliação ANOVA, deve-se aplicar o modelo da Eq. (1).

(C) Avaliar o gráfico de reprodutividade

O gráfico de reprodutividade avalia a média aritmética por operador e ajuda a determinar quais medições e variabilidade são consistentes em todos os operadores.

(D) Avaliar o gráfico de repetitividade

Esse gráfico deve ser usado para verificar se o processo de medição está no controle com relação à repetitividade. Esse gráfico é uma carta de controle de amplitudes que representa graficamente a consistência do operador e é composta por: pontos que representam, para cada operador, a diferença entre a maior e menor medição de cada peça, linha central, que representa a média global das amplitudes e limites de controle (LSC e LIC) para as amplitudes dos subgrupos.

- **Passo 07:** é a fase final onde devem ser descritas as conclusões e recomendações. Uma vez que os dados já foram analisados, o experimento deve extrair conclusões práticas sobre os resultados e recomendar um plano de ação.

4. Análise de Resultados

Neste capítulo expõe-se os resultados obtidos do projeto de pesquisa. Os resultados são apresentados conforme as etapas da metodologia mencionada.

O passo 1 foi a definição do problema, conforme revisão bibliográfica realizada, na literatura foi encontrado diferentes métodos de medição do ângulo de repouso, porém não se sabe qual é o método que possui menor variação e mais confiabilidade. Diante disso essa pesquisa experimental se propôs a comparar diferentes métodos de medição do ângulo de repouso utilizando a ferramenta de R&R para determinar o método com menor variação.

O passo 2 consistiu em definir a variável de resposta como sendo o ângulo de repouso. O ângulo de repouso ($\emptyset_r$) foi determinado através da queda livre de uma determinada porção do produto em cada aparato (Figura 1). Com sua queda, um volume foi formado e dessa forma, mediu-se o ângulo que as paredes deste volume formavam com o plano horizontal utilizando o software ImageJ, que é um programa processador e analisador de imagens em Java de domínio público.

Os aparatos foram desenvolvidos no laboratório da Universidade Federal de Goiás, regional Catalão, para se medir o máximo talude formado pelos grãos em queda. Os equipamentos são constituídos de uma caixa retangular construída em vidro e madeira. O vidro colocado na parte da frente foi escolhido para evitar efeitos eletrostáticos indesejáveis nos materiais granulares devido ao atrito quando enchemos o aparato. Em cada equipamento foram acoplados no centro um funil para descarga do material, simulando tremonhas utilizadas em silos.

No aparato 1 (Figura 1) a queda de fertilizantes ocorre de maneira livre através de um funil fixo no centro e no aparato 2 (Figura 1) foi acrescentando uma placa central fixa e duas saídas laterais usando o mesmo método de descarga do aparato 01. Foram realizados os experimentos visando observar se existe alguma diferença entre os métodos.

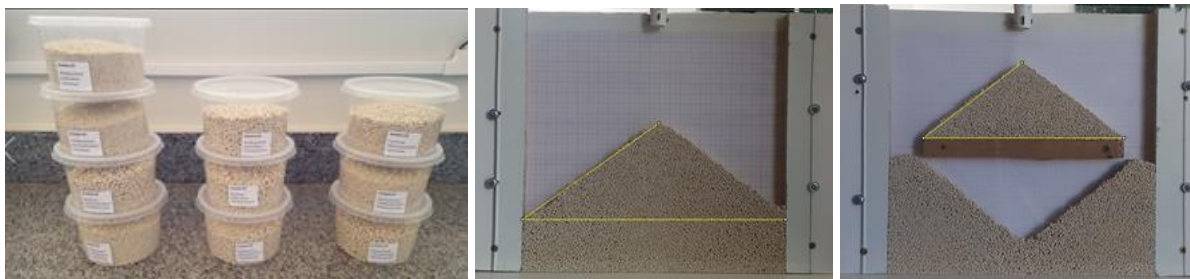


Figura 1 – Amostras de distintas granulometrias e aparatos experimentais 01 e 02.

No passo 03 houve a definição das variáveis de controle, e foi determinado que seriam utilizadas amostras de fertilizantes com três níveis de granulometrias diferentes, classificadas em: fina, intermediária e grossa. Para a realização dos testes foram separadas 10 amostras contendo composições misturadas dessas 03 classificações de granulometrias. Cada amostra possuía uma identificação numérica, de 1 a 10 conforme demonstrado na Figura 1.

O percentual de composição das amostras foi determinado utilizando um projeto experimental baseado em arranjo de mistura. A quantidade de avaliadores determinadas para o estudo foram de três (03) pessoas. Os operadores selecionados foram treinados pelo procedimento estabelecido, para garantir o padrão das medições e foi determinado que cada operador deveria executar o experimento no mesmo aparato três vezes em ordem aleatória.

O passo 04 consistiu na determinação do arranjo experimental e este estudo foi caracterizado como um arranjo aninhado, em um estudo aninhado, cada peça é exclusiva do operador; dois operadores nunca medem a mesma peça. Nesse experimento cada um dos 03 operadores prepararam seus próprios experimentos e realizaram todo o procedimento por 03 vezes, portanto nunca realizavam a medição na mesma peça. O percentual de composição das amostras e todas as observações de medição coletadas para o ângulo de repouso são apresentadas na Tabela 1.

O passo 05 que é a fase de realização dos experimentos as etapas definidas no procedimento experimental foram seguidas, são elas:

- Escolher o aparato para início do experimento.
- Posicionar o aparato no local demarcado, para garantir que todos os experimentos sigam o mesmo padrão.
- Verificar nível do aparato, colocando o instrumento que mede o nível no centro do aparato e observando o que acusam os indicadores do instrumento. A bolha de ar que está dentro do cilindro, rapidamente flutua para cima. Se o centro da superfície estiver nivelado, a bolha vai caminhar para o centro do cilindro (área compreendida no centro das marcações do tubo). Do contrário, vai pender para um dos lados e então deve-se ajustar os lados para obter o correto nivelamento.
- Posicionar máquina fotográfica no tripé no local demarcado.
- Fazer a homogeneização de cada amostra antes de iniciar o experimento

- Despejar a amostra no funil em uma velocidade lenta e constante
- Após finalização do despejo deve-se tirar uma foto no nível correto e realizar a nomeação conforme legenda padronizada descrita abaixo.
- Repetir o mesmo procedimento para as 10 amostras, ao fim das 10 amostras descarregar as fotos em um notebook e utilizando o software Imagej iniciar a medição do ângulo.
- Abrir o software Imagej, abrir a foto que será medida, selecionar a ferramenta de medição do ângulo, escolher como primeiro ponto o ponto mais alto da pilha(A), com cuidado levar o mouse até base formando o ângulo. A medição já aparece no sistema, em seguida anotar na planilha de dados.

Ao fim da execução dos experimentos, no passo 06 realizou-se as análises estatísticas dos dados para o aparato 01 (item 4.1.) e aparato 02 (item 4.2.) conforme as equações definidas na metodologia.

<i>k</i>	<i>i</i>	%fina	%interm.	%grossa	<i>j=1</i>		<i>j=2</i>		<i>j=3</i>	
					Ør1	Ør2	Ør1	Ør2	Ør1	Ør2
1	1	1.00	0.00	0.00	33.73	37.86	34.91	37.02	35.72	37.91
1	2	0.50	0.50	0.00	33.29	36.42	34.75	37.81	31.55	37.98
1	3	0.50	0.00	0.50	33.18	38.37	31.24	35.25	32.18	37.25
1	4	0.00	1.00	0.00	33.35	37.90	34.62	39.14	34.49	40.38
1	5	0.00	0.50	0.50	33.07	39.12	34.15	38.82	32.03	39.73
1	6	0.00	0.00	1.00	31.50	44.38	32.54	45.59	30.46	44.14
1	7	0.33	0.33	0.33	33.63	35.64	34.12	37.05	33.07	37.05
1	8	0.67	0.17	0.17	33.85	36.69	34.14	37.38	34.24	37.12
1	9	0.17	0.67	0.17	33.44	39.08	33.69	37.51	33.25	36.66
1	10	0.17	0.17	0.67	31.13	36.87	33.66	37.55	31.11	36.93
2	1	1.00	0.00	0.00	34.73	38.10	34.77	37.65	34.23	37.89
2	2	0.50	0.50	0.00	32.80	36.66	34.07	36.39	32.01	37.30
2	3	0.50	0.00	0.50	33.02	37.97	31.85	37.99	31.21	35.47
2	4	0.00	1.00	0.00	33.63	39.05	33.53	39.79	31.50	40.88
2	5	0.00	0.50	0.50	30.86	39.28	33.06	37.75	32.50	38.98
2	6	0.00	0.00	1.00	33.06	43.64	32.64	45.10	30.54	44.25
2	7	0.33	0.33	0.33	34.01	35.70	34.55	37.17	31.12	35.35
2	8	0.67	0.17	0.17	32.33	38.54	33.50	35.95	32.47	38.43
2	9	0.17	0.67	0.17	34.10	38.12	32.68	37.55	32.31	38.75
2	10	0.17	0.17	0.67	33.44	38.03	33.02	36.96	33.35	35.38
3	1	1.00	0.00	0.00	34.00	38.38	34.67	36.69	34.33	37.50
3	2	0.50	0.50	0.00	33.91	37.05	34.32	36.29	33.17	36.75
3	3	0.50	0.00	0.50	34.46	36.96	32.01	36.69	32.60	35.66
3	4	0.00	1.00	0.00	33.41	39.50	34.16	39.34	33.69	38.84
3	5	0.00	0.50	0.50	30.11	40.52	34.01	37.78	32.20	40.85
3	6	0.00	0.00	1.00	33.03	45.00	35.15	45.96	30.07	43.21
3	7	0.33	0.33	0.33	32.97	34.72	34.22	36.37	32.75	37.17
3	8	0.67	0.17	0.17	34.16	37.07	33.02	36.75	32.91	38.18
3	9	0.17	0.67	0.17	34.80	37.17	33.91	37.38	33.56	37.48
3	10	0.17	0.17	0.67	34.66	38.08	33.63	37.78	33.91	38.00

Tabela 1 - Dados do experimento GR&R.

4.1. Análise estatística dos dados Aparato 01

(A) Avaliar o índice de classificação do sistema de medição

Para o aparato 1 a Tabela 2 apresenta a avaliação do índice de classificação do sistema de medição (%R&R).

Fonte	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total de R&R da Medição	0,94565	59,93
Repetitividade	0,74461	47,19
Reprodutividade	0,20104	12,74
Peça a Peça	0,63215	40,07
Variação Total	1,57779	100,00

Tabela 2 - Índice de classificação do sistema de medição para o aparato 01.

Os componentes de variância (Varcomp) foram utilizados para comparar a variação de cada fonte de erro da medição da variação total. Realizando a análise da Tabela 2 para o aparato 01, é possível verificar que a variância do erro de medição representa 59,93% da variação total do sistema, ou seja, o sistema de medição é classificado como inaceitável.

Ainda neste passo, foi possível identificar qual a principal fonte de erro de medição: repetitividade ou reprodutividade. Conforme observado na tabela, o item repetitividade apresentou maior percentual de erro (47,19%) do que o item reprodutividade (12,74%).

(B) Avaliar análise de variância (ANOVA)

A Tabela 3 demonstra a análise de variância (ANOVA) realizada para determinar se as médias de dois ou mais grupos são diferentes quando o fator peça está aninhado dentro de operadores. Nessa tabela analisou-se a coluna de p-valor para determinar se as diferenças entre algumas das médias são estatisticamente significativas. Geralmente valores-p menores que 0,05 na tabela ANOVA são estatisticamente significativos.

Fonte	DF	SS	MS	F	P
Operador	2	17,344	8,67214	3,28359	0,053
Amostra (Operador)	27	71,308	2,64105	3,54690	0,000
Repetitividade	60	44,677	0,74461		
Total	89	133,329			

Tabela 3 – Análise de variância ANOVA para aparato 01.

O valor-p para o operador foi de 0,053, isso significa a variação ocorrida entre os operadores não é significativa. Já o valor-p para amostra (operador) apresentou valor menor que 0,05 indicando que o sistema demonstrou diferenças significativas entre as amostras, porém esse comportamento já era esperado pois as amostras foram preparadas com diferentes granulometrias. O gráfico da Figura 2 apresenta essa variação média de cada amostra.

(C) Avaliar o gráfico de reprodutividade

O gráfico de reprodutividade por operador apresentado na Figura 2 apresenta as médias das medições, organizadas por operador, de modo que é possível ver as diferenças entre operadores. Conforme visto na fase ANOVA é possível observar que existe a variação entre os operadores, porém ela não é significativa estatisticamente.

(D) Avaliar o gráfico de repetitividade

A repetitividade que é a variação em função do dispositivo de medição pode ser analisada utilizando o gráfico R chart por operador (Figura 3).

No gráfico “R chart por operador”, encontram-se as amplitudes do processo entre as medidas obtidas por cada operador, sendo possível notar que os valores estão entre os limites de controle para essas amplitudes. Apesar do SM ser considerado inaceitável, houve uma consistência na medição dos operadores, pois todos os pontos aparecem dentro dos limites de controle.

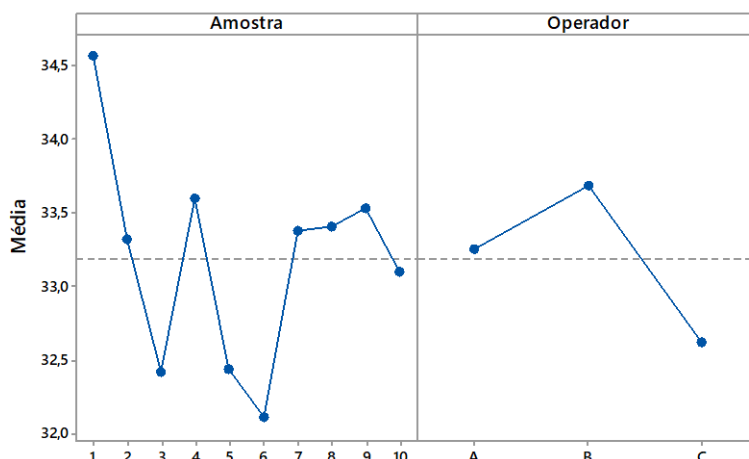


Figura 2 – Média do ângulo de repouso por amostras e por operador do aparato 01.

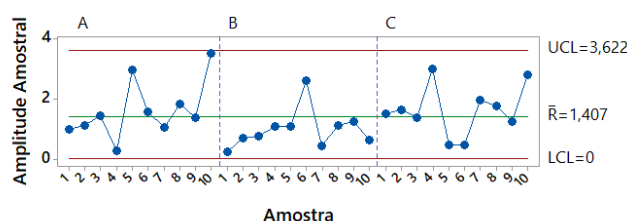


Figura 3 – Carta R Chart por operador do aparato 01.

4.2. Análise estatística dos dados Aparato 02

(A) Avaliar o índice de classificação do sistema de medição

Para o aparato 02 a Tabela 4 apresenta a avaliação do índice de classificação do sistema de medição (%R&R).

Fonte	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total de R&R da Medição	0,58516	8,97
Repetitividade	0,58516	8,97
Reprodutividade	0,00000	0,00
Peça a Peça	5,94168	91,03
Variação Total	6,52684	100,00

Tabela 4 – Índice de classificação do sistema de medição para o aparato 02.

Realizando a análise da Tabela 4, é possível verificar que a variância do erro de medição referente ao Aparato 2 representa 8,97% da variação total do sistema, ou seja, o sistema de medição do aparato 02 pode ser classificado na categoria marginal. Nestes resultados, a coluna %Contribution na tabela mostra que a variação peça a peça é 91,03%. Este valor é muito maior do que a medição R&R total, que é 8,97%. Assim, grande parte da variação é devida a diferenças entre as peças.

Ainda neste passo, foi possível identificar que o item repetitividade apresentou uma variação baixa de 8,97% e o item reprodutividade foi nulo (0%).

(B) Avaliar análise de variância (ANOVA)

A Tabela 5 demonstra a análise de variância (ANOVA) realizada para o aparato 02. O valor-p para o operador foi de 0,984, isso significa a variação ocorrida entre os operadores não é

significativa. Já o valor-p para amostra (operador) apresentou valor menor que 0,05 indicando que o sistema demonstrou diferenças significativas entre as amostras, porém igual aconteceu no aparato 01 esse comportamento também já era esperado pois as amostras foram preparadas com diferentes granulometrias. O gráfico da Figura 4 apresenta essa variação de cada amostra.

Fonte	DF	SS	MS	F	P
Operador	2	0,608	0,3041	0,0165	0,984
Amostra (Operador)	27	497,075	18,4102	31,4620	0,000
Repetitividade	60	35,109	0,5852		
Total	89	532,793			

Tabela 5 – Análise de variância ANOVA para aparato 2.

(C) Avaliar o gráfico de reprodutividade

O gráfico de reprodutividade por operador apresentado na Figura 4 apresenta as médias das medições, organizadas por operador, de modo que é possível ver as diferenças entre operadores. Observa-se uma variação entre os operadores que não significativa estatisticamente.

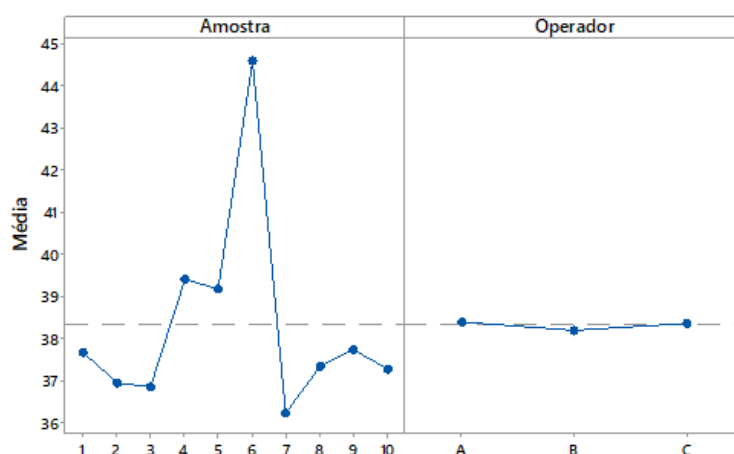


Figura 4 - Média do ângulo de repouso por amostras e por operador do aparato 02.

(D) Avaliar o gráfico de repetitividade

A repetitividade que é a variação em função do dispositivo de medição pode ser analisada utilizando o gráfico R chart por operador (Figura 5). No gráfico “R chart por operador”, foi possível notar que os valores estão entre os limites de controle para essas amplitudes. O sistema demonstrou que houve uma consistência na medição dos operadores, pois todos os pontos aparecem dentro dos limites de controle.

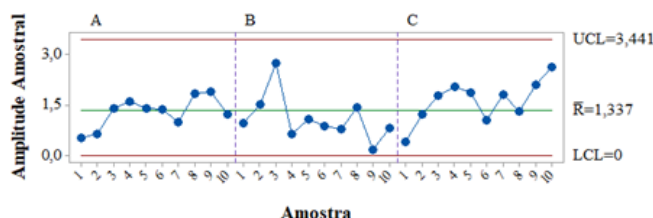


Figura 5 - Carta R Chart por operador do aparato 02.

4.3 Conclusões e recomendações

O estudo de estudo de repetitividade e reprodutividade com arranjos aninhados para os dois aparatos de medição construídos forneceu uma avaliação abrangente do sistema de medição

para a medição do ângulo de repouso para fertilizantes com diferentes granulometrias. Através do índice de classificação do sistema de medição obtido nas análises foi possível concluir que o aparato 01 não atende os critérios de aceitação mínimos para uma medição, pois demonstrou variações elevadas e foi classificado como inaceitável, sendo a repetitividade o item que mais contribuiu na variação da medição, investigar a causa das variações nas medições obtidas, poderá reduzir a variação geral do sistema de medição. A reprodutividade entre avaliadores foi também uma fonte razoável de variação, porém não representou uma significância estatística. Realizar a revisão do POP, poderá reduzir também a variação no sistema.

O sistema de medição para o aparato 02 foi classificado como marginal, o que significa que é potencialmente aceitável (depende da importância da medição, custos, riscos, etc.). Como foi utilizado o mesmo procedimento para execução dos experimentos nos dois aparatos, a diferença percebida entre o aparato 01 e 02 consiste na altura de queda da amostra, que no aparato 02 é menor, e no efeito de parede lateral que o aparato 02 não possui, esses fatores podem ter sido determinantes para os resultados do aparato 02 terem sido melhores que o 01.

Diante disso, recomenda-se planejar outro estudo de R&R em um terceiro aparato para testar diferentes alturas, simular medições com e sem o efeito de parede e assim poder verificar se a altura e o efeito de parede lateral foram de fato os itens determinantes do melhor resultado do aparato 02.

5. Conclusão

Através de um estudo de repetitividade e reprodutividade é possível determinar se um sistema é capaz de fornecer resultados confiáveis de suas medidas, de acordo com a variabilidade do mesmo. Ao analisar o desenvolvimento desse trabalho, pôde-se notar a significativa relevância da confiabilidade dos dados referente ao ângulo de repouso para as indústrias de fertilizantes, pois um sistema de medição confiável contribui bastante para embasar a construção de parâmetros avaliadores na tomada de decisão em projetos de dimensionamento voltados à indústria de fertilizantes.

Este artigo teve como objetivo analisar a variabilidade do processo de medição e comparar o erro de medição existente entre dois diferentes métodos de medição do ângulo de repouso. Perante os dois métodos estudados, o estudo de R&R aplicado possibilitou o conhecimento das causas de variação do sistema de medição, além de verificar se o sistema era estatisticamente correto e capaz de garantir que os valores do ângulo de repouso medido eram condizentes com a realidade. Dessa forma, constatou-se que o aparato 02 construído apresenta um sistema de medição mais eficiente que o aparato 01, como as medições das amostras foram realizadas conforme o mesmo procedimento, a única diferença existente em relação aos dois aparatos era a altura de queda e o efeito das paredes laterais.

Por conta disso, foram sugeridas algumas modificações no procedimento de medição e a realização de novas medições em um terceiro experimento para validar essa hipótese referente a altura e o efeito de parede. Por fim, percebe-se que a pesquisa atingiu com êxito o seu objetivo de analisar o sistema de medição dos dois aparatos, avaliando a confiabilidade dos valores de ângulos gerados. Tendo assim a sua relevância justificada ao conseguir identificar qual aparato apresenta menor variação em seus sistemas de medição.

Agradecimentos

Os autores agradecem todo suporte financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa fornecido pelas agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEG.

Referências

- AL-REFAIE, A.; BATA, N.** Evaluating measurement and process capabilities by GR&R with four quality measures. *Measurement*, v.43, p.842-851, 2010.
- AQUILA, G.; PERUCHI, R. S.; JUNIOR, P. R.; ROCHA, L. C. S.; DE QUEIROZ, A. R.; DE OLIVEIRA PAMPLONA, E.; AND BALESTRASSI, P. P.** Analysis of the wind average speed in different Brazilian states using the nested GR&R measurement system, *Measurement*, vol. 115, pp. 217-222, 2018.
- AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG).** Measurement systems analysis Reference Manual. 4ed. Chrysler, Ford, General Motors Supplier Quality Requirements Task Force , 2010.
- BURDICK, R.K.; BORROR, C.M.; MONTGOMERY, D.C.** A review of methods for measurement systems capability analysis. *Journal of Quality Technology*, v.35, p.342-354, 2003.
- BURDICK, R.K.; BORROR, C.M.; MONTGOMERY, D.C.** Design and Analysis of Gauge R&R Studies: Making Decisions with Confidence Intervals in Random and Mixed ANOVA Models. ASA-SIAM Series on Statistics and Applied Probability, SIAM, Philadelphia, ASA, Alexandria, VA, 2005.
- HAMZAH M. Beakawi Al-Hashemi, OMAR S. Baghabra Al-Amoudi.** A review on the angle of repose of granular materials. *Powder Technology*. 2018, Vol.330, p.397.
- KLUWER, A.C.;** Fertilizer Manual. United Nations Industrial Development Organization and International Fertilizer Development Center. Ed. 3rd, 1998.
- KOU, B.; CAO, Y.; LI, J.; XIA, C.; LI, Z.; DONG, H.; ZHANG, A.; ZHANG, J.; KOB, W.; WANG, Y.** Granular materials flow like complex fluids, *Nature* (2017) 1–13, <https://doi.org/10.1038/nature24062>.
- MAJESKE, K.D.** Approval criteria for multivariate measurement systems. *Journal of Quality Technology*, v.40, p.140-154, 2008.
- MAJESKE, K.D.** Approving vision-based measurement systems in the presence of within-part variation, *Qual. Eng.* 24 (1) (2012) 49–59.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.** Applied Statistics and Probability for Engineers. New York: John Wiley and Sons, 2003
- PETERS, J.F; MUTHUSWAMY, M.; WIBOWO, J.; TORDESILLAS, A.** Characterization of force chains in granular material. *Phys. Rev. E* 72, 041307 – Published 21 October 2005.
- PERUCHI, R. S. PAIVA, A. P. BALESTRASSI, P. P. FERREIRA, J. R. SAWHNEY, R.** Weighted Approach For Multivariate Analysis Of Variance In Measurement System Analysis. *Precision Engineering*. v38, p651–658, 2014.
- RACKL, M.; GRÖTSCH, F.E.; RUSCH, M.; FOTTNER, J.** Qualitative and quantitative assessmentvov 3D-scanned bulk solid heap data, *Powder Technol.* 321 (2017) 105–118, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.08.009>.
- RICHARD, P.; NICODEMI, M.; DELANNAY, R.; RIBIERE, P.; BIDEAU, D.;** Slow relaxation and compaction of granular systems. *Nat. Mater.* 2005; 4:121–128. doi: 10.1038/nmat1300
- SAIKAEW, C.** An implementation of measurement system analysis for assessment of machine and part variations in turning operation. *Measurement*, Vol.118, pp.246-252, 2018.
- SCHULZE, D.** Powders and Bulk solids: behavior, characterization, storage and Flow. Germany, Springer, 2007.
- SCHULZE, D.** Measuring powder flowability: a comparison of test methods — part II, *Powder Bulk Eng.* 10 (1996) 17–28.
- WANG, F.K.; CHIEN, T.W.** Process-oriented basis representation for a multivariate gauge study. *Computers and Industrial Engineering*, v.58, p.143-150, 2010.
- ZANOBINI A. et al.;** Repeatability and Reproducibility techniques for the analysis of measurement systems. *Measurement. Journal of the International Measurement Conferetation*, v. 86, n.2, p.125-132, 2016.
- ZHIGUO G. et al.;** Theoretical and experimental investigation on angle of repose of biomass–coal blends. *Fuel*, v. 116, p. 131-139, 2013.