

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Qualidade das aplicações de fertilizantes sólidos granulados realizadas por
distribuidor de mecanismo centrífugo

Lucas Campos Giosa

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2022

Lucas Campos Giosa
Engenheiro Mecânico

Qualidade em aplicações de fertilizantes sólidos granulados realizadas por distribuidor de mecanismo centrífugo

Orientador:
Prof. Dr. **LEANDRO MARIA GIMENEZ**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Giosa, Lucas Campos

Qualidade em aplicações de fertilizantes sólidos granulados realizadas por distribuidor de mecanismo centrífugo / Lucas Campos Giosa. - - Piracicaba, 2022.

68 p.

Dissertação (Mestrado) - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Distribuidor centrífugo 2. Faixa de aplicação 3. GSI (*Granulometric Spread Index*) 4. Segregação I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e minha noiva, **Antonio Giosa Jr., Marta Maria G. C. Giosa e Marcelle Mayara B. Villas Bôas**, por sempre acreditarem que seria possível, mesmo nos momentos mais desafiadores.

AGRADECIMENTOS

À **Deus** por sempre me guiar em meu caminho e me conceder sabedoria e maturidade.

Ao meu orientador **Dr. Leandro Maria Gimenez**, por ter aceito me auxiliar nesse desafio.

À toda minha **família** pelo grande apoio e pelas orações.

À **Maquinas Agrícola Jacto S/A** por permitir minha participação no programa de pós-graduação e também pela parceria durante a execução do experimento proposto para a pesquisa.

À **Yara Brasil – Fertilizantes** pela disponibilização de insumos, sendo parceiro na execução do experimento proposto para a pesquisa.

À **Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, em especial o seu corpo docente pela qualidade na formação acadêmica.

Enfim, a todos que, das mais diversas formas, me auxiliaram durante esse período.

EPÍGRAFE

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	12
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS DISTRIBUIDORES CENTRÍFUGOS	15
2.1.1. <i>Mecanismo dosador</i>	16
2.1.2. <i>Mecanismo distribuidor</i>	17
2.2. QUALIDADE DE APLICAÇÃO	17
2.2.1. <i>Caracterização do perfil transversal</i>	18
2.2.2. <i>Caracterização da distribuição</i>	20
2.3. FATORES QUE INFLUENCIAM A QUALIDADE DE APLICAÇÃO	21
2.3.1. <i>Características inerentes ao equipamento</i>	22
2.3.2. <i>Características inerentes ao produto aplicado</i>	23
2.4. SEGREGAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO DE FERTILIZANTES A LANÇO	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1. LOCALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	29
3.2. OBTENÇÃO DE DADOS	29
3.2.1. <i>Etapa I</i>	29
3.2.2. <i>Etapa II</i>	33
3.2.2.1. <i>Teste de uniformidade ISO 5690/1 com número reduzido de coletores</i>	36
3.3. PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS	44
3.3.1. <i>Caracterização dos fertilizantes</i>	44
3.3.2. <i>Determinação da largura da faixa com base no coeficiente de variação do perfil transversal</i>	44
3.3.3. <i>Determinação da segregação nas faixas</i>	45
3.3.4. <i>Identificação dos efeitos e associação de fatores</i>	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FERTILIZANTES UTILIZADOS	47
4.2. DETERMINAÇÃO DA FAIXA DE APLICAÇÃO ATRAVÉS DE C.V. EM MASSA	48
4.3. DETERMINAÇÃO DA SEGREGAÇÃO NA LARGURA ÚTIL DE TRABALHO	53
4.4. SEGREGAÇÃO DENTRO DA LARGURA ÚTIL DE TRABALHO	59
5. CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS	64

RESUMO

Qualidade em aplicações de fertilizantes sólidos granulados realizadas por distribuidor de mecanismo centrífugo

A aplicação de fertilizantes com a utilização de equipamentos dotados de mecanismo distribuidor centrífugo de dois discos é amplamente difundida no Brasil. Ao longo dos últimos anos o alcance máximo praticável pelos equipamentos vem aumentando, o que proporciona uma faixa de aplicação maior, porém intensifica a segregação granulométrica das partículas do fertilizante, o que é prejudicial para a qualidade da distribuição do produto no solo. O custo e a quantidade de insumo utilizados nos cultivos das principais culturas agrícolas vem aumentando ano a ano, podendo em alguns casos, representar até 30% do custo de produção. Diante da importância de compreender os fatores que influenciam na qualidade da distribuição de fertilizantes aplicados a lanço com distribuidor de mecanismo centrífugo, principalmente em faixas grandes, essa pesquisa teve por objetivo investigar o fenômeno da segregação granulométrica presente neste tipo operação agrícola. A metodologia empregada foi a de utilizar dois produtos que tivessem comportamentos de segregação potencialmente distintos, medindo a densidade, dureza das partículas e granulometria, essa última utilizando o *Granulometric Spread Index* (GSI) como parâmetro. Parâmetros do mecanismo distribuidor que fossem relevantes para a segregação, baseando-se na literatura disponível, foram incorporados ao estudo. Aplicações com um distribuidor centrífugo de dois discos combinando os níveis dos fatores em um delineamento fatorial inteiramente casualizado foram realizadas para avaliar de maneira qualitativa e quantitativa o comportamento da segregação granulométrica ao longo da faixa de aplicação. Os resultados mostraram que tanto produto com GSI maior como o de GSI menor alcançaram faixas de aplicação equivalentes com coeficiente de variação (C.V.) em massa de 15%, quando comparados nas mesmas condições de ajuste do mecanismo distribuidor, sendo a rotação dos discos lançadores um fator significativo estatisticamente para a largura média da faixa de aplicação, tanto de forma isolada, quanto em interação com o produto de menor GSI. Porém quando a intensidade da segregação granulométrica foi avaliada, verificou-se que o produto de GSI maior apresentou intensidade de segregação granulométrica estatisticamente diferente do que o produto de GSI menor. Também foi avaliada a intensidade da segregação de maneira separada para cada um dos produtos, obtendo diferenças significativas na intensidade da segregação apenas para o produto de GSI menor, e o para o fator dose aplicada. Concluiu-se que é possível medir a intensidade da segregação granulométrica através do índice GSI e que numa aplicação de fertilizantes sólidos com o uso de distribuidor centrífugo de dois discos. A opção por produtos que tenham qualidade física adequada e a correta regulação dos parâmetros do mecanismo distribuidor contribuem de maneira significativa para uma boa uniformidade de distribuição e menor segregação granulométrica mesmo em faixas de aplicação grandes.

Palavras-chave: Distribuidor centrífugo; Faixa de Aplicação; GSI (*Granulometric Spread Index*); Segregação

ABSTRACT

Quality in applications of granulated solid fertilizer performed by spreader with centrifugal mechanism

The application of fertilizers using spreader equipped with a two-disc centrifugal distributor mechanism is widespread in Brazil. Over the last few years, the maximum range practicable by the equipment has been increasing, which provides a wider application range, however increase the granulometric segregation of the fertilizer particles, which is harmful to the quality of the distribution of the product in the soil. The cost and amount of the fertilizer used in the cultivation of the main agricultural crops has been increasing year by year, and in some cases, it may represent up to 30% of the production cost today. Given the importance of understanding the factors that influence the quality of fertilizer distribution applied by a spreader with centrifugal mechanism, especially in large ranges, this research aimed to investigate the phenomenon of granulometric segregation present in this type of agricultural operation. The methodology used was to use two products that potentially had different segregation behaviors, measuring bulk density, particle hardness and granulometry, this latter using the Granulometric Spread Index (GSI) as a parameter. Parameters of the distributor mechanism that were relevant for segregation, based on the available literature, was incorporated to this research. Applications with a two-disc centrifugal distributor in order to combine the levels of the factors in a completely randomized factorial design has been accomplished to be able to evaluate both qualitatively and quantitative the behavior of granulometric segregation along the application range. The results showed that both the product with a higher GSI and a lower GSI reached equivalent application ranges with a coefficient of variation (CV) in mass of 15%, when compared under the same conditions of adjustment of the distributor mechanism, with the rotation of the launching discs being a statistically significant factor for the mean width of the application range, both in isolation and in interaction with the product of lower GSI. However, when the intensity of granulometric segregation was evaluated, it was seen that the product of larger GSI presented intensity of granulometric segregation statistically different than the product of smaller GSI. The segregation intensity was also evaluated separately for each of the fertilizers, and in this evaluation condition, significant differences were observed in the segregation intensity only for the lower GSI product, and the applied dose factor was statistically significant. It was concluded that it is possible to measure the intensity of granulometric segregation through the GSI index and that in an application of solid fertilizers with the use of a centrifugal distributor with two discs. The option for products that have adequate physical quality and the correct adjustment of the parameters of the distributor mechanism contribute significantly to good distribution uniformity and lower granulometric segregation even in large application ranges.

Keywords: Spinner-disc spreader; Application range; GSI (Granulometric Spread Index); Segregation

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: DISTRIBUIDOR DE CORRETIVOS DE ARRASTO, EQUIPADO COM MECANISMO DOSADOR VOLUMÉTRICO E MECANISMO DISTRIBUIDOR TIPO DISCO DUPLO. 1 E 2. MECANISMO DOSADOR VOLUMÉTRICO DO TIPO ESTEIRA TRANSPORTADORA E COMPORTA RASPADORA, 3. CARDAN PARA ACIONAMENTO PELA TDP, 4. MECANISMO DISTRIBUIDOR TIPO DISCO DUPLO. FONTE: MIALHE 1986.....	15
FIGURA 2: VISTA TRASEIRA DE UM DISTRIBUIDOR CENTRÍFUGO PADRÃO COM IDENTIFICAÇÃO DOS COMPONENTES PRINCIPAIS. FONTE: COLLEY ET AL, 2018 (ADAPTADO)	16
FIGURA 3: EXEMPLOS DE MECANISMOS DISTRIBUIDORES DE CONSTRUÇÃO CONTEMPORÂNEA. FONTE: BANCO DE IMAGENS SULKY E AMAZONE (ADAPTADO)	17
FIGURA 4: EXEMPLOS DO ENSAIO NORMALIZADO PARA CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL TRANSVERSAL DE DISTRIBUIÇÃO. A) ENSAIO EM AMBIENTE FECHADO E COM SISTEMAS DE PESAGEM AUTOMÁTICA DOS COLETORES. B) ENSAIO EM CAMPO ABERTO REALIZADO COM APARATO EXPERIMENTAL TRADICIONAL. FONTE: A) DANISH TECHNOLOGICAL INSTITUTE (DTI). B) COLLEY ET AL, 2018.	18
FIGURA 5: CURVA DE C.V. NA PORÇÃO SUPERIOR E PERFIL TRANSVERSAL DE DISTRIBUIÇÃO NA PORÇÃO INFERIOR. RESULTADOS TÍPICOS DE UMA DISTRIBUIÇÃO REALIZADA COM UM DISTRIBUIDOR DE DISCOS CENTRÍFUGO.	19
FIGURA 6: DISTRIBUIÇÃO TRANSVERSAL SIMULADA PARA O PERFIL TRANSVERSAL, EM AZUL, E PARA A SOBREPOSIÇÃO, EM MARROM, PARA A OPERAÇÃO NO SISTEMA ALTERNADO DE PASSADAS DO EQUIPAMENTO. A DISTÂNCIA L ENTRE AS PASSADAS DETERMINA A LARGURA ÚTIL DE TRABALHO.	20
FIGURA 7: DISPOSITIVO DE TESTES DO CEMAGREF CEMIB, E DIAGRAMA MOSTRANDO O PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO. FONTE: YULE E GRAFTON 2013.....	21
FIGURA 8: EXEMPLOS DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO EM APLICAÇÕES A LANÇO. FONTE: ADAPTADO DE YULE E GRAFTON, 2013; PIRON ET AL, 2017; YINYAN ET AL, 2018.	21
FIGURA 9: REPRESENTAÇÃO DO FLUXO DE PRODUTO PELAS PÁS DE UM DISTRIBUIDOR CENTRÍFUGO. FONTE: VERA ET AL, 2014.	22
FIGURA 10: SISTEMAS DE ACIONAMENTO DOS DISCOS PARA DISTRIBUIDORES CENTRÍFUGOS DE DOIS DISCOS. FONTE: A) WESTERN, 2020. B) GARVEY, 2015.....	22
FIGURA 11: REPRESENTAÇÃO DOS TIPOS DE PÁS UTILIZADAS NO ESTUDO DE YILDIRIM (2008). FONTE YILDIRIM, 2008.	23
FIGURA 12: RESISTÊNCIA MECÂNICA DE DIFERENTES TIPOS DE FERTILIZANTES. FONTE: YARA BRASIL IND. DE FERTILIZANTES, 2020. ..	26
FIGURA 13: DISTRIBUIÇÃO DE AMOSTRA DAS PARTÍCULAS DE FERTILIZANTE ILUSTRANDO OS VALORES D16, D50 E D84. FONTE: FULTON & PORT, 2016.	27
FIGURA 14: COPO CALIBRADOR DE VOLUME 1 L, BALANÇA DIGITAL COM PRECISÃO DE 0,01 G, AGITADOR MECÂNICO E CONJUNTO DE PENEIRAS.....	30
FIGURA 15: APRESENTAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO GRANULÔMETRO. FONTE: ADAPTADO DE SULKY, 2015.	31
FIGURA 16: ILUSTRAÇÃO DA LEITURA DE RESULTADO DO TESTE DE GRANULOMETRIA UTILIZANDO DISPOSITIVO DO FABRICANTE DO DISTRIBUIDOR. FONTE: ADAPTADO DE JACTO, 2019.....	32
FIGURA 17: VISTAS GERAIS DO DISTRIBUIDOR CENTRÍFUGO UNIPOINT 5030NPK. FONTE: BANCO DE IMAGENS - JACTO.	33

FIGURA 18: PÁS UTILIZADAS NO DISTRIBUIDOR CENTRÍFUGO. A ESQUERDA O CONJUNTO PADRÃO DO EQUIPAMENTO, COM PERFIL DE CONDUÇÃO DUPLO E A DIREITA O CONJUNTO PROPOSTO PARA CONTRASTAR, COM PERFIL DE CONDUÇÃO SIMPLES.	34
FIGURA 19: CROQUI ESQUEMÁTICO DA INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO DE CAMPO PARA TESTES DE UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO.	35
FIGURA 20: CAMPO EXPERIMENTAL INSTALADO PARA AS COLETAS DE MATERIAL DURANTE OS TESTES DE UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO.	35
FIGURA 21: PREPARAÇÃO DO CAMPO EXPERIMENTAL PARA AS AVALIAÇÕES DE UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO. RONDONÓPOLIS MT. FONTE: MÁQUINAS AGRÍCOLAS JACTO S/A - 2016.	37
FIGURA 22: CURVA DE C.V. E PERFIL TRANSVERSAL DE DISTRIBUIÇÃO PARA APLICAÇÃO DO PRODUTO CLORETO DE POTÁSSIO (KCl) COM LARGURA ÚTIL DE 32 M. LEITURA REALIZADA COM OS COLETORES DISPOSTOS EM INTERVALOS DE 0,5 M ENTRE SI.	38
FIGURA 23: CURVA DE C.V. E PERFIL TRANSVERSAL DE DISTRIBUIÇÃO PARA APLICAÇÃO DO PRODUTO CLORETO DE POTÁSSIO (KCl) COM LARGURA ÚTIL DE 32 M. LEITURA REALIZADA COM OS COLETORES DISPOSTOS EM INTERVALOS DE 1,67 M ENTRE SI.	39
FIGURA 24: CURVA DE C.V. E PERFIL TRANSVERSAL DE DISTRIBUIÇÃO PARA APLICAÇÃO DO PRODUTO UREIA COM LARGURA ÚTIL DE .40	
FIGURA 25: CURVA DE C.V. E PERFIL TRANSVERSAL DE DISTRIBUIÇÃO PARA APLICAÇÃO DO PRODUTO UREIA COM LARGURA ÚTIL DE .41	
FIGURA 26: CURVA DE C.V. E PERFIL TRANSVERSAL DE DISTRIBUIÇÃO PARA APLICAÇÃO DO PRODUTO 36-00-12 COM LARGURA ÚTIL DE 26 M. LEITURA REALIZADA COM OS COLETORES DISPOSTOS EM INTERVALOS DE 0,5 M ENTRE SI.	42
FIGURA 27 CURVA DE C.V. E PERFIL TRANSVERSAL DE DISTRIBUIÇÃO PARA APLICAÇÃO DO PRODUTO 36-00-12 COM LARGURA ÚTIL DE 26 M. LEITURA REALIZADA COM OS COLETORES DISPOSTOS EM INTERVALOS DE 1,67 M ENTRE SI.	43
FIGURA 28: PRODUTOS ESCOLHIDOS PARA O EXPERIMENTO. A ESQUERDA A FÓRMULA 13-00-36 (A) UMA MISTURA DE GRÂNULOS E A DIREITA O PRODUTO 27-00-00 + Mg (B) MISTURA DE NITROGÊNIO, CÁLCIO E MAGNÉSIO NO GRÂNULO.....	47
FIGURA 29: DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS PARA O PRODUTO 13-00-36 A ESQUERDA E 27-00-00 A DIREITA. DIVISÃO DAS CAVIDADES POR TAMANHO DE PARTÍCULA SENDO A (<4,00 MM), B (3,15 MM – 4,00 MM), C (2,50 MM – 3,15 MM), D (2,00 MM – 2,50 MM) E E (>2,00 MM)	48
FIGURA 30: COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (C.V.) PARA SOBREPOSIÇÕES SIMULADAS EM DIFERENTES LARGURAS. CADA TRATAMENTO TEVE DUAS REPETIÇÕES (1) E (2) COM O MESMO PRODUTO APLICADO (A), O MESMO TIPO DE PÁ FOI UTILIZADO NO DISCO (DUP). FORAM VARIADAS A ROTAÇÃO DO MECANISMO DISTRIBUIDOR (810) E (735), BEM COMO A DOSE (150) E (400).	49
FIGURA 31: COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (C.V.) PARA SOBREPOSIÇÕES SIMULADAS EM DIFERENTES LARGURAS. CADA TRATAMENTO TEVE DUAS REPETIÇÕES (1) E (2) COM O MESMO PRODUTO APLICADO (A), O MESMO TIPO DE PÁ FOI UTILIZADO NO DISCO (SIMP). FORAM VARIADAS A ROTAÇÃO DO MECANISMO DISTRIBUIDOR (810) E (735), BEM COMO A DOSE (150) E (400).	49
FIGURA 32: COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (C.V.) PARA SOBREPOSIÇÕES SIMULADAS EM DIFERENTES LARGURAS. CADA TRATAMENTO TEVE DUAS REPETIÇÕES (1) E (2) COM O MESMO PRODUTO APLICADO (B), O MESMO TIPO DE PÁ FOI UTILIZADO NO DISCO (DUP). FORAM VARIADAS A ROTAÇÃO DO MECANISMO DISTRIBUIDOR (810) E (735), BEM COMO A DOSE (150) E (400).	50
FIGURA 33: COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (C.V.) PARA SOBREPOSIÇÕES SIMULADAS EM DIFERENTES LARGURAS. CADA TRATAMENTO TEVE DUAS REPETIÇÕES (1) E (2) COM O MESMO PRODUTO APLICADO (B), O MESMO TIPO DE PÁ FOI UTILIZADO NO DISCO (SIMP). FORAM VARIADAS A ROTAÇÃO DO MECANISMO DISTRIBUIDOR (810) E (735), BEM COMO A DOSE (150) E (400).	50
FIGURA 34: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS MÉDIAS DO FATOR ISOLADO E INTERAÇÃO QUE RESULTAM EM FAIXA DE APLICAÇÃO ESTATISTICAMENTE DIFERENTE, NÍVEL DE CONFIANÇA DE 99%. NO GRÁFICO DA ESQUERDA O PONTO CENTRAL INDICA A MÉDIA E A LINHA VERTICAL ENTRE OS TRAÇOS HORIZONTAIS REPRESENTAM O DESVIO PADRÃO PARA A MÉDIA.	52

- FIGURA 35: GSI AO LONGO DA FAIXA DE APLICAÇÃO. AS LINHAS PLOTADAS NA FIGURA TÊM O MESMO PRODUTO APLICADO (A), O MESMO TIPO DE PÁ FOI UTILIZADO NO DISCO (DUP). TIVERAM VARIAÇÃO A ROTAÇÃO DO MECANISMO DISTRIBUIDOR (810) E (735) E A DOSE (150) E (400)..... 53
- FIGURA 36: GSI AO LONGO DA FAIXA DE APLICAÇÃO. AS LINHAS PLOTADAS NA FIGURA TÊM O MESMO PRODUTO APLICADO (A), O MESMO TIPO DE PÁ FOI UTILIZADO NO DISCO (SIMP). TIVERAM VARIAÇÃO A ROTAÇÃO DO MECANISMO DISTRIBUIDOR (810) E (735) E A DOSE (150) E (400)..... 54
- FIGURA 37: GSI AO LONGO DA FAIXA DE APLICAÇÃO. AS LINHAS PLOTADAS NA FIGURA TÊM O MESMO PRODUTO APLICADO (B), O MESMO TIPO DE PÁ FOI UTILIZADO NO DISCO (DUP). TIVERAM VARIAÇÃO A ROTAÇÃO DO MECANISMO DISTRIBUIDOR (810) E (735) E A DOSE (150) E (400)..... 54
- FIGURA 38: GSI AO LONGO DA FAIXA DE APLICAÇÃO. AS LINHAS PLOTADAS NA FIGURA TÊM O MESMO PRODUTO APLICADO (B), O MESMO TIPO DE PÁ FOI UTILIZADO NO DISCO (SIMP). TIVERAM VARIAÇÃO A ROTAÇÃO DO MECANISMO DISTRIBUIDOR (810) E (735) E A DOSE (150) E (400)..... 55
- FIGURA 39: DISTRIBUIÇÃO RELATIVA DA MASSA RETIDA POR TAMANHO DE MALHA NAS PENEIRAS. 55
- FIGURA 40: RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY DOS FATORES RELEVANTES PARA A RESPOSTA GSI MÉDIO NA LARGURA DE APLICAÇÃO A DIREITA. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS MÉDIAS DA RESPOSTA PARA OS NÍVEIS DO FATOR PRODUTO A DIREITA. NO GRÁFICO O PONTO CENTRAL INDICA A MÉDIA E A LINHA VERTICAL ENTRE OS TRAÇOS HORIZONTAIS REPRESENTAM O DESVIO PADRÃO PARA A MÉDIA. 57
- FIGURA 41: RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY DOS FATORES RELEVANTES PARA A RESPOSTA GSI MÉDIO NA LARGURA DE APLICAÇÃO A DIREITA. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS MÉDIAS DA RESPOSTA PARA OS NÍVEIS DO FATOR DOSE A DIREITA. NO GRÁFICO O PONTO CENTRAL INDICA A MÉDIA E A LINHA VERTICAL ENTRE OS TRAÇOS HORIZONTAIS REPRESENTAM O DESVIO PADRÃO PARA A MÉDIA. 58
- FIGURA 42: RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY DOS FATORES RELEVANTES PARA A RESPOSTA GSI MÉDIO NA REGIÃO CENTRAL DA LARGURA DE APLICAÇÃO A DIREITA. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS MÉDIAS DA RESPOSTA PARA OS NÍVEIS DO FATOR PRODUTO A DIREITA. NO GRÁFICO O PONTO CENTRAL INDICA A MÉDIA E A LINHA VERTICAL ENTRE OS TRAÇOS HORIZONTAIS REPRESENTAM O DESVIO PADRÃO PARA A MÉDIA. 60
- FIGURA 43: RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY DOS FATORES RELEVANTES PARA A RESPOSTA GSI MÉDIO NA REGIÃO CENTRAL DA LARGURA DE APLICAÇÃO A DIREITA. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS MÉDIAS DA RESPOSTA PARA OS NÍVEIS DO FATOR DOSE A DIREITA. NO GRÁFICO O PONTO CENTRAL INDICA A MÉDIA E A LINHA VERTICAL ENTRE OS TRAÇOS HORIZONTAIS REPRESENTAM O DESVIO PADRÃO PARA A MÉDIA. *MÉDIAS SEGUIDAS DE LETRAS MAIÚSCULAS DIFERENTES DENTRO DE UM MESMO FATOR OU DA COMBINAÇÃO DE FATORES INDICAM DIFERENÇA ESTATÍSTICA AO NÍVEL DE 1% SEGUNDO O TESTE DE TUKEY. 62

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: FERTILIZANTES COMERCIAIS VARIADOS, FÓRMULA NPK E DENSIDADE APARENTE.....	24
TABELA 2: RESISTÊNCIA MECÂNICA DE DIFERENTES TIPOS DE FERTILIZANTES. FONTE: UESC, 2013.....	26
TABELA 3: DIFERENÇAS DE SGN E SUA INTERPRETAÇÃO QUANTO À COMPATIBILIDADE PARA MISTURAS DE PRODUTOS FONTE: FULTON & PORT, 2016.....	28
TABELA 4: ÍNDICE GSI E SUA INTERPRETAÇÃO. FONTE: MANUAL DE MÉTODOS ANALÍTICOS OFICIAIS PARA FERTILIZANTES E CORRETIVOS 2014.....	28
TABELA 5: FATORES E NÍVEIS DO EXPERIMENTO PROPOSTO A CAMPO.....	34
TABELA 6: COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DO PERFIL TRANSVERSAL DE TRÊS PRODUTOS PARA ARRANJOS DE COLETORES ESPAÇADOS EM 0,5 E 1,67 M.	44
TABELA 7: CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO PARA AS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FERTILIZANTES. FONTES: ADAPTADO DE ALCARDE, 2007. FULTON & PORT, 2016. MAPA, 2014.....	44
TABELA 8: PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FERTILIZANTES UTILIZADOS NA PESQUISA.	47
TABELA 9: IDENTIFICAÇÃO E CONFIGURAÇÃO DOS FATORES PARA AS REPETIÇÕES. FAIXA DE APLICAÇÃO DE TRABALHO PARA C.V. DE 15%.....	48
TABELA 10: ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA FAIXA DE APLICAÇÃO ÚTIL COM C.V. DE 15%.	51
TABELA 11: QUADRO RESUMO DO TESTE DE TUKEY A 99% DE CONFIANÇA, APLICADO AOS FATORES DE INTERESSE ESTATÍSTICO	52
TABELA 12: GSI MÉDIO COM SOBREPOSIÇÃO REFERENTE A FAIXA DE TRABALHO CONSIDERANDO C.V. DE 15% DE CADA REPETIÇÃO.	53
TABELA 13: ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA ESQUEMA FATORIAL INTEIRAMENTE CASUALISADO PARA RESPOSTA GSI MÉDIO NA LARGURA DE APLICAÇÃO COM SOBREPOSIÇÃO.	56
TABELA 14: ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA RESPOSTA GSI MÉDIO NA LARGURA DE APLICAÇÃO COM SOBREPOSIÇÃO NAS REPETIÇÕES QUE UTILIZARAM O PRODUTO 27-00-00.....	58
TABELA 15: GSI MÉDIO COM SOBREPOSIÇÃO REFERENTE A REGIÃO CENTRAL DA FAIXA DE TRABALHO EM CADA REPETIÇÃO.....	59
TABELA 16: ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA ESQUEMA FATORIAL INTEIRAMENTE CASUALISADO PARA RESPOSTA GSI MÉDIO NA PORÇÃO CENTRAL DA FAIXA DE APLICAÇÃO COM SOBREPOSIÇÃO. INTERVALO DE CONFIANÇA DE 99%.	59
TABELA 17: ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA ESQUEMA FATORIAL INTEIRAMENTE CASUALISADO PARA RESPOSTA GSI MÉDIO NA REGIÃO CENTRAL DA FAIXA DE APLICAÇÃO COM SOBREPOSIÇÃO NAS REPETIÇÕES QUE UTILIZARAM O PRODUTO 27-00-00. INTERVALO DE CONFIANÇA DE 99%.	61

1. INTRODUÇÃO

O agronegócio brasileiro desempenha um papel importante na balança econômica do país, sendo o setor produtivo de melhor desenvolvimento econômico nos últimos anos, e o único a apresentar crescimento durante o ano de 2020 (IBGE, 2021). Também se mostra cada vez mais engajado com práticas intensivas de produção, agregando tecnologia nas operações, aumentando a produtividade e buscando minimizar os custos. Nesse contexto a produção de grãos e cereais destaca-se pela incorporação de novas tecnologias. Entre as principais atividades de manejo dessas está a adubação, responsável por corrigir eventuais deficiências de nutrientes e mantê-los em níveis suficientes para que a cultura instalada possa ter produtividade satisfatória.

Dentro do contexto de aumento da produtividade e garantia da rentabilidade no agronegócio, as práticas de correção e fertilização do solo assumem lugar de destaque, sendo responsáveis por ganhos de até 50% de produtividade das culturas (GIRACCA & NUNES, 2016). O manejo destas práticas deve ser o mais correto possível, visando a maximização da eficiência dos efeitos benéficos dos fertilizantes e corretivos agrícolas e dos retornos dos investimentos dispensados com estes insumos, sem descuidar da conservação dos recursos naturais (GIRACCA & NUNES, 2016).

Durante os últimos dois anos, foram entregues ao mercado nacional, um montante de 37,25 e 42,54 milhões de toneladas de fertilizantes respectivamente, representando um acréscimo de 14,2% no total consumido (ANDA, 2022). O custo dos fertilizantes pode representar até 30% do custo total de produção das principais culturas agrícolas comerciais, e as fontes dos macronutrientes N e K, importadas em sua grande maioria, e sofreram reajustes significativos em seus preços durante 2020 (MICHELI et al., 2021)

O método mais utilizado atualmente para as operações de adubação é a aplicação em superfície por meio de distribuidores que utilizam mecanismo centrífugo de dois discos. A ampla utilização desse tipo de aplicador está atrelada ao fato de que a operação de adubação tem sua capacidade operacional elevada e com menor custo quando comparada à adubação feita no sulco junto com a semeadura (MATOS et al., 2006).

O aumento de preços dos fertilizantes aliado à necessidade de assegurar aplicação adequada demanda melhorias no desempenho dos distribuidores centrífugos para garantir maior precisão de dosagem e uniformidade na aplicação. A aplicação inadequada causa perdas econômicas e impactos ambientais negativos. A falta de sobreposição desejada quando se empregam distribuidores centrífugos leva a uma produtividade reduzida da cultura (SOGAARD e KIERKEGAARD, 1994). A indústria de fertilizantes desenvolveu o conceito dos 4C's para administração dos nutrientes (Dose certa, Fonte correta, Hora certa e Local correto), enfatizando o posicionamento preciso dos nutrientes como maneira de melhorar a aplicação e o uso dos mesmos no campo (THAPER, 2014). A qualidade da aplicação é, entretanto, influenciada por diversos fatores, sendo a segregação um dos fatores preponderantes nas aplicações de fertilizantes com mecanismos centrífugos.

A agência reguladora do ministério da agricultura, que estabelece e regulamenta todos os critérios técnicos para a importação, fabricação e comercialização fertilizantes no Brasil, publicou no diário oficial da união, na instrução normativa n°39 de 08 de agosto de 2018 em seu capítulo II, as regras de classificação dos diferentes tipos de fertilizantes sólidos utilizados na agricultura, podendo ser destacados dois índices numéricos ligados à dimensão das partículas e nível de segregação, são eles o GSI acrônimo oriundo do inglês (granulometric

spread index), o qual estabelece critério quantitativo classificatório quanto ao nível de segregação através do peneiramento do produto; e o SGN, também oriundo do inglês (size guide number) o qual faz referência à dimensão mediana da partícula de determinado produto. Através dessa normativa, o fabricante de fertilizante sólido é incentivado a apresentar os índices GSI e SGN no rótulo ou nota fiscal do produto comercializado.

Este trabalho buscou verificar se por meio de ajustes de parâmetros operacionais do mecanismo distribuidor é possível alterar a qualidade de distribuição, considerando não apenas a largura da faixa de aplicação, mas também a segregação.

Para isso o trabalho buscou caracterizar as distâncias de lançamento para dois fertilizantes distintos aplicados por meio de distribuidor centrífugo, alterando e avaliando quais parâmetros de ajuste do mecanismo distribuidor afetam a segregação granulométrica e a qualidade de aplicação. De forma mais específica os objetivos podem ser descritos como segue.

Caracterizar dois fertilizantes comerciais quanto às propriedades físicas reconhecidas na literatura como importantes na aplicação com distribuidores centrífugos;

Estabelecer quais as distâncias máximas a serem adotadas para assegurar um perfil de distribuição uniforme, em termos de massa, após a sobreposição;

Avaliar a qualidade em termos de segregação de partículas para o perfil transversal sobreposto das distâncias definidas com base na avaliação de uniformidade em massa;

Identificar como os fatores em estudo influenciam a qualidade e se há uma combinação deles para obter uma aplicação com maximização da largura de aplicação e minimização da segregação granulométrica dos produtos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Características construtivas dos distribuidores centrífugos

Os distribuidores centrífugos são equipamentos muito comuns no mercado de máquinas agrícolas, e conseqüentemente, no parque de máquinas agrícolas brasileiro. Estes equipamentos para aplicação de produtos sólidos têm como características principais a simplicidade construtiva, a facilidade de regulagem e a alta capacidade operacional (MIALHE,1986). O seu principal uso é na aplicação de produtos agrícolas para correção e adubação do solo como calcário, gesso agrícola, fertilizantes granulados minerais e organominerais, e na semeadura a lanço de culturas de cobertura, como: aveia, braquiária ou outra pastagem, milho, nabo forrageiro ou crotalária (MILAN & GADANHA JR, 1996).

A maioria utiliza dois discos como elemento lançador, valendo-se da força centrífuga para imprimir energia às partículas que chegarão ao solo, após desenvolver uma trajetória balística. O mecanismo distribuidor desses equipamentos utiliza a energia gerada pela tomada de potência (TDP) do trator ou pelo sistema hidráulico de fluxo contínuo para imprimir energia às partículas e, conseqüentemente, lançá-las a distâncias consideráveis. Os produtos mais leves, como sementes, são lançados a menores distâncias e os mais pesados, como fertilizantes granulados, a distâncias maiores, atingindo assim, maior largura de aplicação (ORTIZ-CAÑAVATE, 2003).

Esse tipo de equipamento extrai e dosifica o produto do interior de um reservatório também denominado de caçamba através de uma corrente ou esteira transportadora que o transfere, através de um funil condutor, para os dois discos com pás rotativas em direções opostas, os quais realizam o espalhamento do produto no campo (THAPER, 2014).

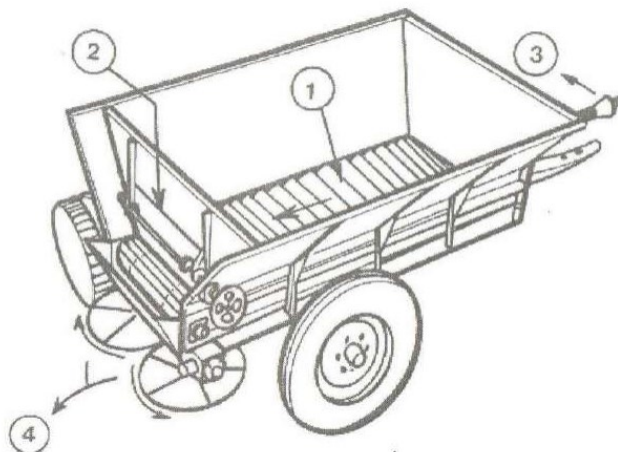


Figura 1: Distribuidor de corretivos de arrasto, equipado com mecanismo dosador volumétrico e mecanismo distribuidor tipo disco duplo. 1 e 2. Mecanismo dosador volumétrico do tipo esteira transportadora e comporta raspadora, 3. Cardan para acionamento pela TDP, 4. Mecanismo distribuidor tipo disco duplo. Fonte: Mialhe 1986.

Nos últimos anos os fabricantes de máquinas vêm aprimorando as tecnologias de aplicação disponíveis nos equipamentos, obtendo uma melhoria significativa na qualidade de distribuição, proporcionando larguras úteis de aplicação também maiores. Com a possibilidade de mapear o perfil de distribuição, o foco das pesquisas recentes tem sido o de

tornar o perfil de distribuição variável em função da necessidade, e controlado pelos mecanismos do distribuidor. (YULE e GRAFTON 2013)

2.1.1. Mecanismo dosador

Distribuidores centrífugos podem utilizar sistema de dosagem volumétrica para controlar a quantidade de produto a ser aplicada. A alimentação do sistema pode ser feita pela ação da gravidade, ou por condução controlada através de esteira ou corrente transportadora.

Em sistemas de dosagem com alimentação de produto feita através de esteira ou corrente transportadora, a vazão é definida pela altura da porta dosadora e velocidade da esteira ou corrente transportadora. Os fabricantes normalmente disponibilizam as recomendações para altura da comporta dosadora por tipo de produto a ser aplicado (ex. fertilizante ou calcário) e na vazão desejada (kg s^{-1}). Controladores de dosagem precisam de calibração dos seus mecanismos para garantir uma aplicação precisa. Utilizam normalmente constantes de calibração que podem ser ajustadas para se obter a dose desejada (kg ha^{-1}) controlando a vazão e obtendo usualmente erro inferiores a 5% na dose (COLLEY et al, 2018).

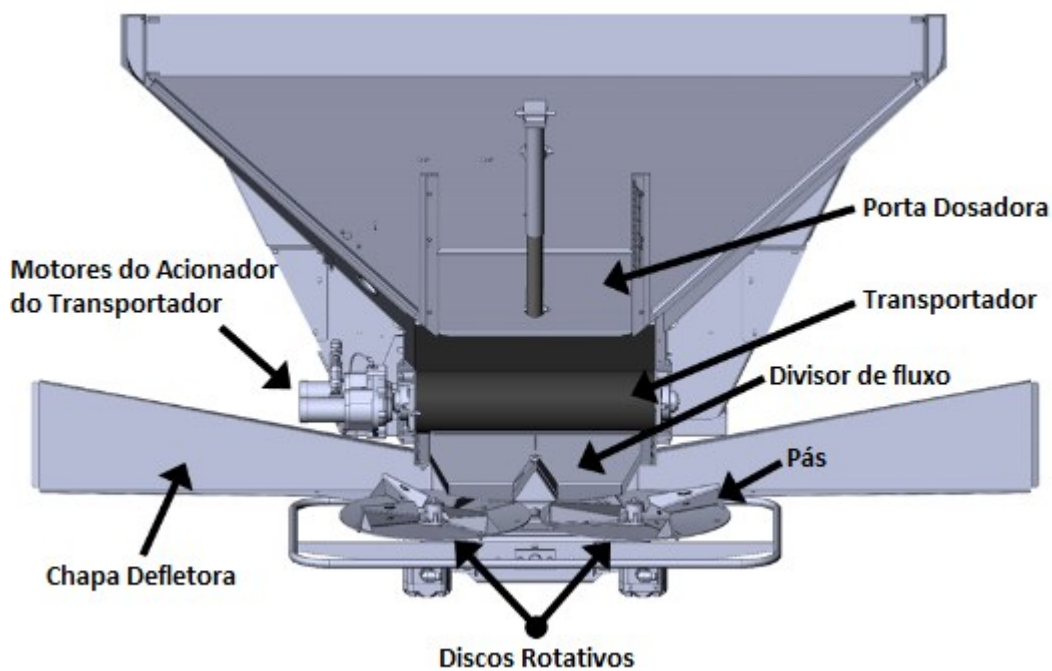


Figura 2: Vista traseira de um distribuidor centrífugo padrão com identificação dos componentes principais. Fonte: Colley et al, 2018 (adaptado)

O processo padrão de calibração dos mecanismos dosadores consiste em coletar uma quantidade de produto pela esteira ou corrente transportadora enquanto a máquina percorre uma distância conhecida, ou utilizar a função de calibração do controlador eletrônico da máquina, sendo possível nessa opção realizar a coleta de produto com a máquina estacionada. A quantidade coletada pela saída do transportador é então comparada com a quantidade desejada. Nesse tipo de sistema eletrônico, é possível atingir ajustes para manter o erro de dosagem do sistema inferior a 5% (COLLEY et al, 2018).

2.1.2. Mecanismo distribuidor

Distribuidores centrífugos utilizam discos com pás em sua superfície, que de acordo com princípio o físico da aceleração centrífuga, transferem energia cinética para as partículas, as quais deixam as pás em altas velocidades sendo lançadas em trajetória oblíqua até atingirem o solo.

Numa aplicação com faixa de aplicação de 30 m utilizando um distribuidor centrífugo, observa-se, para cada um dos lados, que as partículas que caem nas regiões mais externas da faixa viajam até 22,5 m a partir do centro de cada disco. Com isso busca-se assegurar uma sobreposição da quantidade aplicada em passadas laterais de modo a obter um coeficiente de variação (C.V.) transversal baixo. Considerando o posicionamento dos discos a 1,5 m do solo, para que as partículas atinjam 22,5 m de distância de lançamento, a velocidade requerida na saída das pás é de aproximadamente 60 m s^{-1} (GRAFTON et al, 2014).

A resistência aerodinâmica das partículas influencia a distância de lançamento sendo a intensidade desse fenômeno expressa por um coeficiente K. Diversas características dos fertilizantes como densidade, formato e tamanho da partícula influenciam o coeficiente, porém, a mais influente é o tamanho das partículas. Os valores de K para fertilizantes variam bastante, mas comumente estão entre $0,025 \text{ m}^{-1}$ a $0,25 \text{ m}^{-1}$ (HOFSTEE e HUISMAN, 1990). Quanto maior o valor K, menor será a trajetória da partícula lançada, pelo fato da resistência aerodinâmica ser maior.

Comparando-se um modelo matemático teórico para ação da força de arrasto em um movimento de queda livre para partículas perfeitamente esféricas com testes práticos utilizando amostras de fertilizantes comerciais, Hofstee et al. (1997) mostraram que além do tamanho o comportamento aerodinâmico das partículas de fertilizantes é influenciado por sua natureza não-esférica. Utilizando o KCl como exemplo, tem-se que as suas partículas de um determinado tamanho possuem coeficiente de arrasto semelhante ao de partículas perfeitamente esféricas com diâmetro médio até 40 % maior.



Figura 3: Exemplos de mecanismos distribuidores de construção contemporânea. Fonte: Banco de imagens Sulky e Amazone (adaptado)

2.2. Qualidade de aplicação

De acordo com Milan & Gadanha Junior (1996), os principais parâmetros para se caracterizar o desempenho de um distribuidor centrífugo são a uniformidade de distribuição transversal, de distribuição longitudinal e a regularidade de vazão. Quanto ao parâmetro de regularidade de vazão, mecanismos dosadores volumétricos com correta calibração garantem a qualidade necessária para o funcionamento satisfatório do equipamento. O parâmetro de

distribuição transversal exige, entretanto, determinações mais elaboradas para a correta caracterização e possíveis ajustes.

2.2.1. Caracterização do perfil transversal

Um método normatizado para avaliar a uniformidade da aplicação realizada por distribuidores centrífugos é sugerido pela norma ASAE S341.5. Essa norma define termos, estabelece as condições e os procedimentos de ensaio, assim como a maneira de relatar os resultados da avaliação. Ela é semelhante à norma ISO 5.690/1, que igualmente trata de condições de ensaio, procedimentos e resultados esperados.

Segundo Parish (1999) o procedimento básico de medição da largura de aplicação é simples. Várias bandejas são dispostas na superfície do terreno em uma linha reta, perpendicular ao sentido de tráfego da adubadora. É importante haver no mínimo 10 bandejas dispostas ao longo da largura de aplicação que se deseja trabalhar. A largura de coleta deve ser maior do que a largura útil de aplicação, visando coletar também as partículas que são arremessadas mais distantes. O material coletado é pesado individualmente por bandeja.

A norma ISO 5.690/1 prevê coletores padronizados de 1,00 m de comprimento, 0,25 m de largura e profundidade mínima de 0,15 m. Prevê ainda precauções para evitar o ricochete do produto aplicado, como exemplo menciona uma grade alveolada com dimensões do alvéolo de 0,05 x 0,05 m, cuja altura não deve ultrapassar a altura do coletor, ou uma malha quadriculada apoiada sobre os coletores.



Figura 4: Exemplos do ensaio normalizado para caracterização do perfil transversal de distribuição. A) Ensaio em ambiente fechado e com sistemas de pesagem automática dos coletores. B) Ensaio em campo aberto realizado com aparato experimental tradicional. Fonte: A) Danish Technological Institute (DTI). B) Colley et al, 2018.

A métrica normalmente utilizada para caracterizar a largura efetiva de aplicadores centrífugos baseia-se no coeficiente de variação (CV) do perfil transversal resultante da sobreposição de passadas laterais do equipamento. Molin et al (2015) menciona que se deve considerar um valor baixo de CV na definição da largura de aplicação, podendo se levar em consideração um rastro já deixado por um equipamento com largura definida, caso do pulverizador barras por exemplo, visando a escolha da faixa de aplicação a ser utilizada no campo.

Lawrence et al. (2006) mostram através de testes comparativos entre os métodos normalizados internacionais para caracterização de uniformidade de distribuição que, estabelecendo-se um método padronizado para a avaliação e mantendo-o em todas as

repetições, principalmente em testes comparativos entre equipamentos, os resultados serão confiáveis e trarão uma resposta cientificamente válida. Os autores enfatizaram que a concentração de pontos amostrais mais próximos ao centro do perfil de distribuição descreve o comportamento do distribuidor com maior fidelidade.

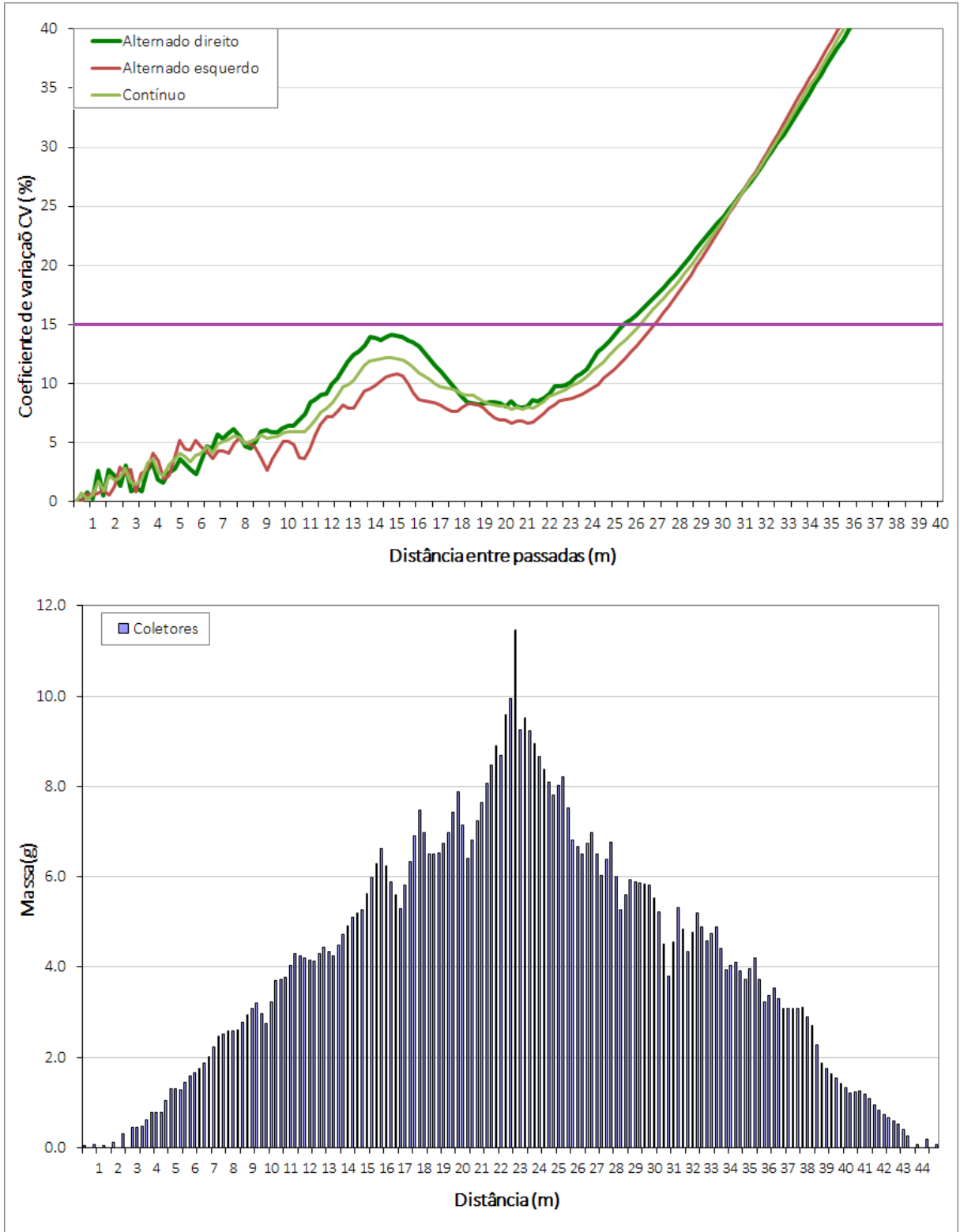


Figura 5: Curva de C.V. na porção superior e perfil transversal de distribuição na porção inferior. Resultados típicos de uma distribuição realizada com um distribuidor de discos centrífugo.

2.2.2. Caracterização da distribuição

A caracterização do perfil transversal permite, de forma simplificada em corte transversal, visualizar a forma com que o produto é lançado no campo, em uma passada do equipamento. Molin et al (2015) demonstraram que no campo as passadas do equipamento se sobrepõem, tanto transversalmente, quanto longitudinalmente, promovendo assim a distribuição de produto em área total.

No campo, o distribuidor pode realizar o caminhamento em um único sentido (usualmente denominado trajeto contínuo), ou em sentidos opostos (usualmente denominado trajeto alternado). Por meio da simulação de recobrimentos sucessivos do perfil transversal de aplicação tanto no sistema contínuo quanto no alternado, é possível calcular o CV para cada situação de recobrimento simulado em larguras crescentes, como mostrado na Figura 5 - esquerda, além de também ser viável apresentar graficamente o perfil transversal da distribuição, o qual leva em conta as sobreposições existentes entre as passadas.

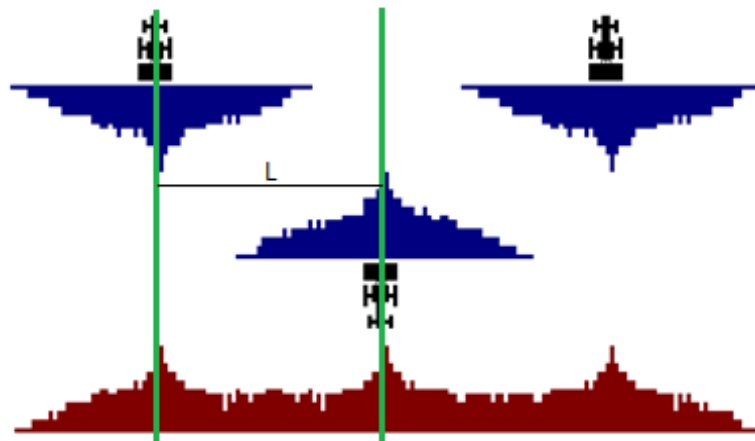


Figura 6: Distribuição transversal simulada para o perfil transversal, em azul, e para a sobreposição, em marrom, para a operação no sistema alternado de passadas do equipamento. A distância L entre as passadas determina a largura útil de trabalho.

Grift & Hofstee (2002) demonstraram que durante os últimos anos foram realizadas uma série de aprimoramentos nas medições do perfil transversal de distribuição, principalmente pela melhoria nos recursos computacionais empregados para análise, possibilitando assim a realização de simulações, adicionando mais informações nos gráficos de caracterização da distribuição, tanto transversal quanto longitudinal.

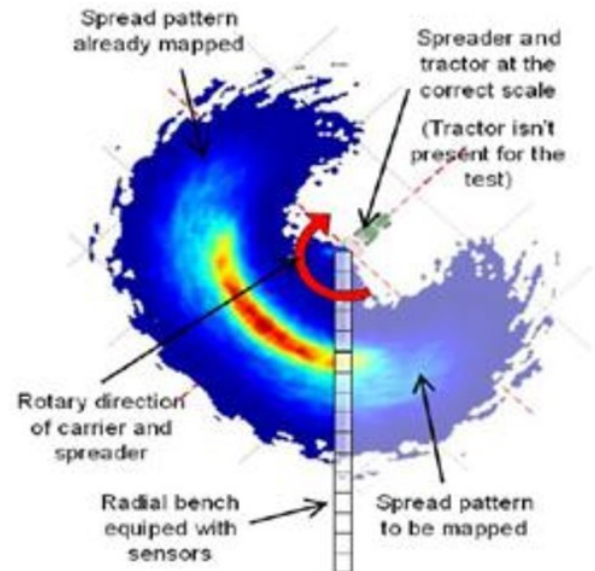


Figura 7: Dispositivo de testes do CEMAGREF CEMIB, e diagrama mostrando o princípio de operação. Fonte: YULE e GRAFTON 2013.

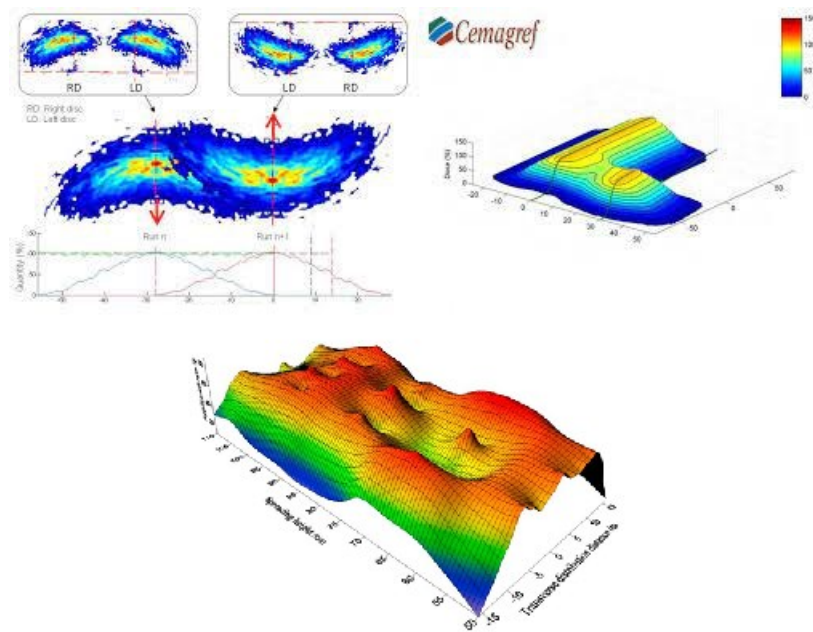


Figura 8: Exemplos de simulações computacionais para caracterização da distribuição em aplicações a lanço. Fonte: Adaptado de Yule e Grafton, 2013; Piron et al, 2017; Yinyan et al, 2018.

2.3. Fatores que influenciam a qualidade de aplicação

A aplicação de fertilizantes sólidos através de distribuidor de mecanismo centrífugo é influenciada por diversos fatores. Nesta pesquisa foram estudados alguns inerentes ao equipamento distribuidor, e outros inerentes ao produto aplicado.

2.3.1. Características inerentes ao equipamento

A velocidade dos discos do distribuidor influencia a distância de aplicação e a sua uniformidade. Vera et al. (2012) apresenta a existência de comportamentos distintos do fluxo do produto que passa através da pá do distribuidor, conforme a rotação dos discos aumenta ou diminui.

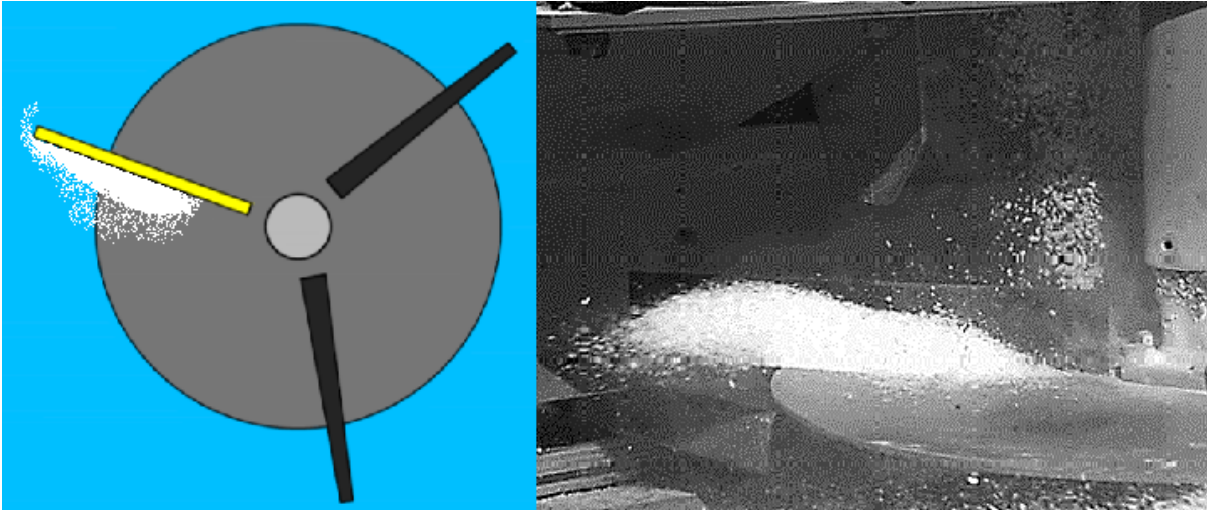


Figura 9: Representação do fluxo de produto pelas pás de um distribuidor centrífugo. Fonte: Vera et al, 2014.

Em termos práticos, no uso do equipamento em campo, Colley et al (2018) enfatizam que podem existir variações de velocidade significativas entre os dois discos, ou também, a velocidade do disco exibida ao operador não corresponder à velocidade real. Isso pode distorcer os perfis de distribuição. Para distribuidores de discos duplos, a velocidade deve ser semelhante entre os discos e não devem variar mais de 10 rpm entre um disco e outro se o acionamento for individual. Para acionamento dos discos através de caixa de transmissão, a equalização da rotação dos discos está garantida através da transmissão da rotação de forma mecânica e simultânea entre o acionamento e os dois discos. A mesma variação máxima de 10 rpm também vale para a leitura do controlador e a rotação real, medida no tacômetro.

A Figura 10 (A) apresenta um exemplo de acionamento dos discos feito por transmissão mecânica, e na Figura 10 (B) há um exemplo de acionamento individual dos discos feito por motores hidráulicos.

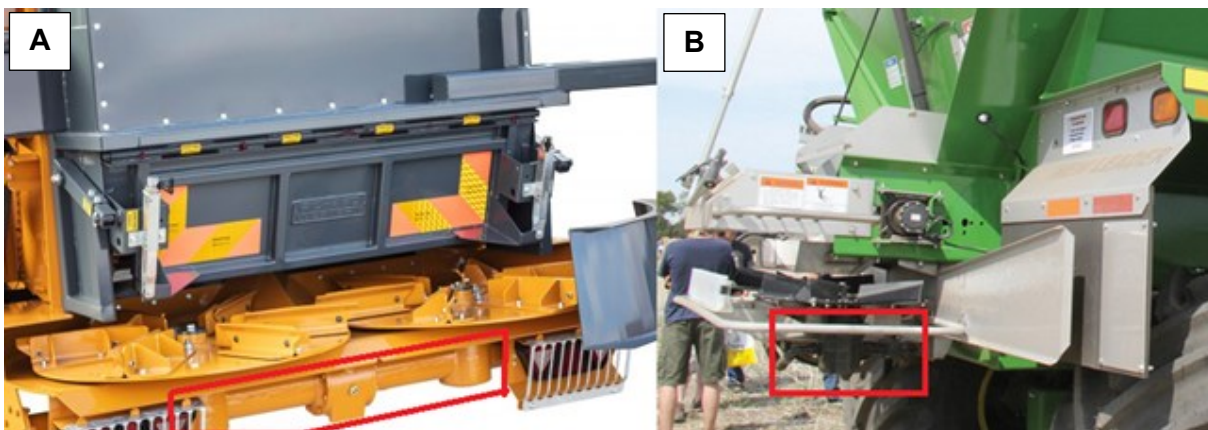


Figura 10: Sistemas de acionamento dos discos para distribuidores centrífugos de dois discos. Fonte: A) Western, 2020. B) Garvey, 2015.

A uniformidade da distribuição também pode ser impactada pelo desenho das pás que estão posicionadas sobre os discos. Yildirim (2008) aplicou superfosfato triplo (SFT) e nitrato de amônio com cálcio (CAN) utilizando um distribuidor centrífugo de um disco, com diferentes modelos de pás: reta (a), curvada para frente 5 mm (b_1), curvada para frente 10 mm (b_2), curvada para trás 5 mm (b_3) e curvada para trás 10 mm (b_4).

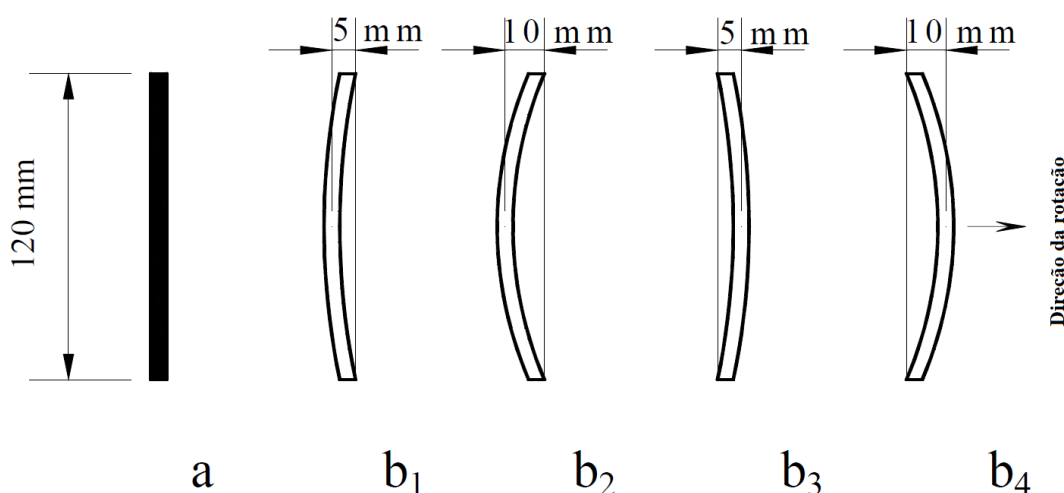


Figura 11: Representação dos tipos de pás utilizadas no estudo de Yildirim (2008). Fonte Yildirim, 2008.

A distribuição mais uniforme foi alcançada utilizando-se a pá curvada para frente 5 mm ($CV = 9\%$ para SFT e $CV = 10\%$ para CAN). Em contrapartida, o projeto de pás retas gerou a pior uniformidade de distribuição ($CV = 16\%$ para SFT e $CV = 17\%$ para CAN). Outros estudos relataram que o perfil das pás e a posição delas no disco influenciam o fluxo de produto, afetando assim o padrão de distribuição resultante (YILDIRIM e KARA, 2003; YILDIRIM, 2006; YILDIRIM, 2008; YILDIRIM e KARA, 2012). Yildirim e Kara (2003) realizaram um estudo com alturas de pás diferentes, e aplicaram superfosfato triplo (SFT) e nitrato de amônio com cálcio (CAN). Foram identificadas distribuições com CV variando entre 7% e 20% para aplicação de SFT. Ao utilizar o CAN, os resultados apresentaram CV entre 6% e 17%. O número de pás montadas no disco também impacta a uniformidade de distribuição para distribuidor centrífugo (YILDIRIM, 2006). Os resultados indicaram que a distribuição mais uniforme foi obtida utilizando 2 pás em vez de 4, 6, 8, 10 ou 12. A uniformidade da distribuição piorou (aumento do CV) conforme o número de pás foi aumentado.

2.3.2. Características inerentes ao produto aplicado

De acordo com Hofstee (1990) e Molin et al (2009), as propriedades físicas das partículas de um fertilizante são muito dependentes do processo produtivo e do uso de aditivos como condicionadores e micronutrientes, e algumas destas propriedades afetam diretamente a qualidade da aplicação de fertilizantes granulados em superfície e estão discriminadas a seguir.

É do entendimento comum que a granulometria, seguida da densidade das partículas são as propriedades que exercem maior influência na aplicação com distribuidores centrífugos (FULTON e PORT, 2016).

A densidade aparente refere-se à relação de massa de uma amostra com o volume que ocupa, usualmente expressa em kg m^{-3} para fertilizantes granulados. O volume total

inclui volume de partículas, volume vazio entre partículas e volume interno de poros. Geralmente, a densidade aparente é medida de duas maneiras; 1) densidade aparente solta ou 2) densidade aparente compactada. O método de medição da densidade aparente solta é definido através da ISO 3944: 1992 e basicamente trata-se da densidade obtida ao despejar uma amostra de fertilizante em um recipiente de volume conhecido (aproximadamente 1L) sem qualquer compactação durante o processo. Já a densidade aparente compactada tem seu método de medição estabelecido pela ISO 5311: 1992. Em geral a medição é semelhante ao da densidade aparente solta, mas o recipiente é compactado ou pressionado. A amostra de fertilizante é despejada de uma altura constante e a uma taxa constante no recipiente, e ela vai sendo acomodada por compactação até que o volume aparente da amostra se torne quase constante (THAPER, 2014).

A densidade aparente varia para diferentes fertilizantes e mesmo para um mesmo tipo de fertilizante. Densidade aparente próxima ou maior que 1000 Kg m⁻³ normalmente proporciona a obtenção de grandes distâncias de lançamento. O nitrato de amônio (34-0-0) tem uma densidade aparente de 900-1000 kg m⁻³ e o sulfato de amônio (21-0-0) 800-900 kg m⁻³ (Solution for agriculture,2020). Ambos os produtos fornecem nitrogênio (N), mas seus valores de densidade são diferentes. Misturas de potássio, como a 30-0-20 e a 36-0-12 fornecem nitrogênio, mas possuem diferentes densidades aparentes; respectivamente 750 kg m⁻³ e 850 kg m⁻³ (Solution for agriculture,2020).

Tabela 1: Fertilizantes comerciais variados, fórmula NPK e densidade aparente.

Produto	Concentração de nutriente N-P ₂ O ₅ -K ₂ O (%)	Densidade aparente (kg m ⁻³)
Nitrato de amônio	34-0-0	900-1000 ¹
Sulfato de amônio	21-0-0	800-900 ¹
Ureia	46-0-0	700-800 ¹
Fosfato monoamônico (MAP)	10-46-0	900-1000 ²
Cloreto de potássio (KCl)	0-0-60	1000-1100 ¹
Super fosfato triplo	0-46-0	1000-1200 ¹
Mistura	0-20-10	1100 ²
Mistura	36-0-12	750 ¹
Mistura	30-0-20	850 ²
Mistura	23-03-12	1000 ²
Mistura	0-18-20	1100 ²
Mistura	24-0-17	1000 ²

Fonte: (1) Solutions for agriculture, 2020. (2) The Mosaic Company, 2020

O tamanho de partícula é a medida do tamanho médio dos grânulos normalmente descrito pela medição de um único diâmetro, mas nominal, para uma carga inteira ou amostra de fertilizante. Como o tamanho das partículas varia dentro do fertilizante, a distribuição do tamanho das partículas (granulometria), indicando a variabilidade no tamanho, é normalmente estudada e medida para os fertilizantes. O tamanho de partícula e a distribuição dos diferentes tamanhos, têm influência direta na largura e uniformidade da aplicação por distribuidores centrífugos (FULTON e PORT, 2016).

Para aplicações de fertilizantes utilizando distribuidores de discos rotativos, é importante utilizar fertilizantes com pouca variação de diâmetro (\emptyset) das partículas. Além disso, partículas com $\emptyset < 1$ mm devem ser evitadas ou retiradas da composição do produto, pois essas partículas causam um aumento no C.V. do perfil transversal e exigem a redução da faixa de aplicação de aplicação; partículas com diâmetro entre 1 mm e 2 mm devem estar na menor concentração possível para que o C.V. se mantenha baixo. De maneira geral as

partículas de fertilizante possuem \varnothing que podem chegar a 5mm. Numa composição mista de fertilizantes, a variação do \varnothing das partículas deve ficar em torno de 10% (HOFSTEE e HUISMAN, 1990).

Para Alcarde, 2007 os problemas de segregação são maiores para mistura de grânulos, mas isso não é uma regra. Segundo ele, com o controle de qualidade eficiente das matérias-primas da composição dessas misturas permite obter-se produtos de boa qualidade no aspecto físico.

A instrução normativa do Ministério da Agricultura nº39 de 8 de agosto de 2018 em seu capítulo II regulamenta a classificação de um fertilizante sólido quanto à sua granulometria. No quadro 1 pode-se verificar essa classificação.

Quadro 1:Classificação de fertilizantes sólidos quanto à sua granulometria.

NATUREZA FÍSICA	ESPECIFICAÇÃO DE NATUREZA FÍSICA	GARANTIA GRANULOMÉTRICA	
		Peneira	Partículas Passantes
SÓLIDO	Granulado e Mistura de Grânulos	4,80 mm (ABNT 4)	100%
		2 mm (ABNT 10)	40% máximo
		1 mm (ABNT 18)	5% máximo
	Microgranulado	2,80 mm (ABNT 7)	90% mínimo
		1 mm (ABNT 18)	10% máximo
	Pó	2,0 mm (ABNT 10)	100%
		0,84 mm (ABNT 20)	70% mínimo
		0,3 mm (ABNT 50)	50% mínimo
	Farelado	4,80 mm (ABNT 4)	95% mínimo
		2,8 mm (ABNT 7)	80% mínimo
		0,84 mm (ABNT 20)	25% máximo
	Pastilha	Frações moldadas de formato e tamanhos variáveis	

Fonte: I. N. nº39 – MAPA, 2018.

O fertilizante deve ter resistência mecânica razoável para suportar toda a manipulação necessária desde sua fabricação até sua distribuição no campo. Os métodos de medição da resistência mecânica não são padronizados, tornando difícil a comparação entre os resultados das medições. A força mínima para quebrar as partículas dos fertilizantes deveria ser de 15 N, porém existem produtos com resistência menor, a ureia é um exemplo. Os processos de fabricação e a utilização de aditivos influenciam a resistência mecânica da partícula (HOFSTEE e HUISMAN, 1990).

Apesar de Hofstee e Huisman (1990) apresentarem em sua pesquisa que não há método padronizado para a medição da resistência mecânica das partículas de fertilizantes, alguns fabricantes disponibilizam informações quantitativas sobre essa característica para alguns fertilizantes, mensurada pela força necessária para quebrar uma partícula de diâmetro médio entre 2 mm e 2,5 mm, expressando assim a resistência mecânica das partículas em kgf grão⁻¹. Para Alcarde, 2007, fertilizantes com dureza menor que 1,4 kgf grão⁻¹ e diâmetro médio apresentados acima são considerados muito fracos para um manuseio sem problemas, sendo desejáveis valores acima de 2,3 kgf grão⁻¹. Na Tabela 2 e na Figura 12 são apresentadas resistências mecânicas conforme especificação de dois fabricantes.

Tabela 2: Resistência mecânica de diferentes tipos de fertilizantes. Fonte: UESC, 2013.

Fertilizante	Valor médio (kgf grão ⁻¹)	Intervalo (kgf grão ⁻¹)
Nitrato de amônio	1,37	1,00 – 1,57
Fosfato monoamônico (MAP)	3,73	1,51 – 5,72
Fosfato diamônico (DAP)	2,69	1,62 – 5,35
Superfosfato triplo (SFT)	1,30	0,90 – 3,45
Cloreto de potássio	5,80	3,50 – 7,20

Produtos com maior dureza podem ser aplicados com maiores rotações nos discos (>800 rpm). Já produtos com baixa dureza, devem ser aplicados com rotações menores que 800 rpm. A rotação dos mecanismos deve estar, portanto, condicionada à resistência para evitar partículas destruídas durante a aplicação.

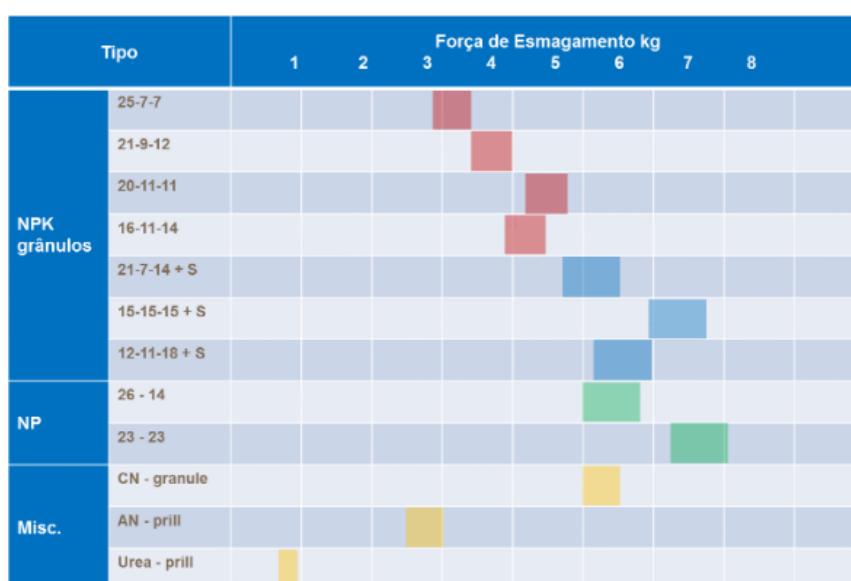


Figura 12: Resistência mecânica de diferentes tipos de fertilizantes. Fonte: Yara Brasil ind. de fertilizantes, 2020.

Uma forma empírica de medir a dureza das partículas em campo é aplicando pressão nas partículas individualmente. Um teste simplificado com os dedos pode ser utilizado para avaliar a dureza das partículas (FULTON e PORT, 2016)

- Partículas que se quebram pressionando-as entre o polegar e outro dedo qualquer, são consideradas de baixa dureza, usualmente deve-se utilizar rotações <700 rpm;
- Partículas que se quebram pressionando-as entre os dedos e uma superfície “dura” (parede), são consideradas de média dureza, usualmente deve-se utilizar rotações na faixa de 700-800 rpm.
- Partículas que não se quebram pressionando-as entre os dedos e uma superfície “dura” (parede), são consideradas de alta dureza, usualmente pode-se utilizar rotações >800 rpm.

Alcarde, 2007 também apresenta um método simplificado de medição da dureza das partículas dos fertilizantes, sem a utilização de ferramentas, obtendo-se uma interpretação semelhante à de Fulton e Port, 2016 para as diferentes condições de teste para as partículas.

2.4. Segregação na distribuição de fertilizantes a lanço

Em decorrência da composição granulométrica, os fertilizantes sólidos podem apresentar segregação, ou seja, a separação das partículas componentes de uma mistura por ordem de tamanho e densidade. As partículas de fertilizantes podem ser desuniformes em decorrência da qualidade do processo industrial e da quebra de grânulos devido à baixa consistência. A segregação prejudica particularmente a uniformidade dos teores de micronutrientes quando uma quantidade relativamente pequena da fonte, geralmente em formato de pó, é adicionada às misturas de grânulos (MOLIN et al. 2009).

Fulton e Port (2016) apresentaram informações sobre as definições do tamanho mediano de partícula (d_{50}) ou Size Guide Number (SGN) de uma amostra de fertilizante granulado. Em relação à uniformidade de um produto para a distribuição, é utilizado o índice GSI (Granulometric Spread Index) ou o índice UI (Uniformity Index), sendo indicado aos fabricantes de fertilizantes mostrar essa informação na folha de especificação.

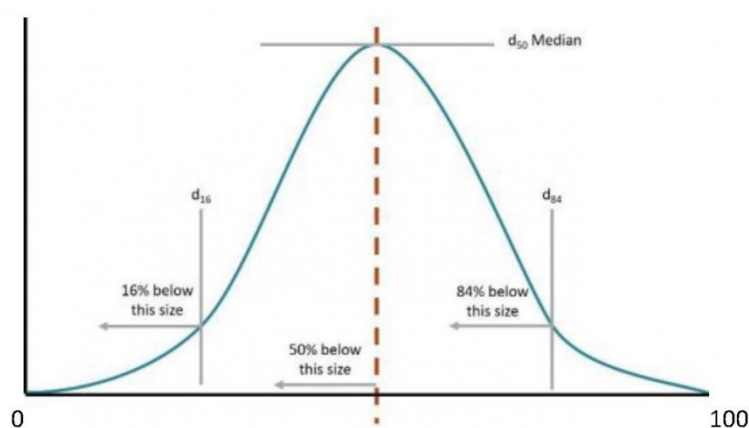


Figura 13: Distribuição de amostra das partículas de fertilizante ilustrando os valores d_{16} , d_{50} e d_{84} . Fonte: FULTON & PORT, 2016.

Na Figura 13 é apresentado um gráfico representativo da dispersão dos diâmetros de uma mistura de partículas e identificados alguns dos pontos tomados no cálculo dos índices para caracterizar a variabilidade na composição granulométrica.

O ponto D_{50} representa a malha da peneira pelo qual 50% da amostra de fertilizante é retida no peneiramento.

O ponto D_{16} representa a malha da peneira pelo qual 16% da amostra de fertilizante é retida no peneiramento.

O ponto D_{84} representa a malha da peneira pelo qual 84% da amostra de fertilizante é retida no peneiramento.

SGN é o índice que representa a mediana do tamanho de partícula de uma amostra de fertilizante multiplicado por 100. Um fertilizante que tenha um D_{50} de partícula de 1,5 mm, possui um $SGN = 150$. Quando peneirado, esse fertilizante tende a ter 50% das partículas retidas na peneira com abertura de malha de 1,5 mm.

$$SGN = D_{50} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

É preciso considerar os valores de SGN ao produzir uma mistura de fertilizantes. O SGN pode indicar se existe compatibilidade entre os componentes da mistura de fertilizantes

individuais. Fulton & Port (2016) enfatizam que nas misturas de grânulos a diferença entre os SGN dos componentes não deve ser maior que 10, assegurando que a mistura seja aplicada de forma uniforme, reduzindo assim o risco de segregação. A tabela 3 apresenta classes de compatibilidade nas misturas considerando seus SGN.

Tabela 3: Diferenças de SGN e sua interpretação quanto à compatibilidade para misturas de produtos Fonte: FULTON & PORT, 2016.

Dif. do SGN	Interpretação
0-10	Boa compatibilidade
11-20	Compatibilidade moderada
Maior que 20	Incompatíveis

A instrução normativa do Ministério da Agricultura (MAPA) nº39 de 8 de agosto de 2018 em seu capítulo II regulamenta alguns critérios e conceitos técnicos para determinar a classificação de um fertilizante quanto à sua segregação. O GSI, Índice de dispersão de partículas, é utilizado para expressar a dispersão granulométrica das partículas de um produto. A forma de cálculo e a interpretação dos valores do GSI são estabelecidos no Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos, este aprovado por Instrução Normativa do MAPA. A classificação quanto à segregação de um determinado produto através do GSI é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4: Índice GSI e sua interpretação. Fonte: Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos 2014.

Valor do GSI	Interpretação
Até 20	Baixa segregação: indica que o produto tem alta uniformidade de aplicação.
De 20 a 25	Média segregação: indica que o produto tem média uniformidade de aplicação.
Maior que 25	Alta segregação: indica que o produto tem baixa uniformidade de aplicação.

O cálculo para expressar o GSI é obtido através de um teste de peneiramento de uma amostra de fertilizante, utilizando-se dos valores de peneiras D_{16} , D_{50} , e D_{84} já apresentados anteriormente e calculado pela Equação 2.

$$GSI = \frac{(D_{16} - D_{84})}{2 \times D_{50}} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

O índice de uniformidade (UI) também pode ser utilizado para caracterizar a uniformidade das partículas de um fertilizante. Na prática, UI entre 40 e 60 indicam que um fertilizante possui uniformidade. Quanto mais afastado da faixa de UI entre 40 e 60, maior a variabilidade de tamanho de partículas existe no fertilizante. Para o cálculo utilizam-se os valores de peneiras d_{95} e d_{10} , através da Equação 3.

$$UI = \left(\frac{D_{95}}{D_{10}} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para ser possível conduzir a pesquisa foram necessários uma série de materiais e procedimentos para coletar dados, bem como analisá-los tanto qualitativamente quanto quantitativamente. Esse capítulo trás essas informações, sistematizadas de forma a mostrar os procedimentos, materiais e ferramentas utilizados para a coleta de dados e análise dos mesmos.

3.1. Localização dos ensaios

A determinação das propriedades físicas dos fertilizantes utilizados nos ensaios, a execução dos testes para as análises de perfil transversal, uniformidade de distribuição e segregação de fertilizantes sólidos granulados aplicados com distribuidor centrífugo de dois discos foram conduzidos no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Máquinas Agrícolas Jacto S/A, localizado em Pompéia, estado de São Paulo, latitude 22,11°S e longitude 50,25°L.

3.2. Obtenção de dados

A coleta de dados foi subdividida em etapas, I - caracterização das propriedades físicas dos fertilizantes, realizada em laboratório; II – coleta dos fertilizantes selecionados para caracterização do perfil transversal combinando-se diferentes regulagens do distribuidor centrífugo; e III – preparação, peneiramento e pesagens das amostras depositadas nos coletores.

3.2.1. Etapa I

Na etapa I os produtos utilizados nos experimentos foram selecionados, escolhendo dois produtos com índice GSI contrastantes, oriundos de formulação mista de NPK com mais de um componente base. Para sua seleção, foi realizado um teste preliminar de medição do GSI em diversos produtos de modo a identificar produtos contrastantes.

Na sequência foi realizada medição da densidade aparente dos produtos escolhidos, utilizando o método da norma ISO 3944: 1992. O valor de densidade aparente adotado foi obtido pelo cálculo da média de cinco repetições de aferição. Como ferramental, foi utilizado um copo coletor com volume calibrado de 1 L e uma balança com precisão de 0,01 g.

A medição da granulometria das partículas dos diferentes fertilizantes foi realizada de duas maneiras distintas. A primeira é a metodologia disponível no Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos (MAPA, 2014), utilizada oficialmente para determinação do GSI de cada um dos produtos utilizados no experimento. Outra, através de um método sugerido pelo fabricante do equipamento distribuidor, e necessária para realizar parte da calibração do equipamento, antes da aplicação dos produtos em campo.

Para a execução do método do MAPA de determinação da granulometria dos fertilizantes e do índice GSI, foram utilizados um jogo de peneiras redondas do fabricante TPL com aberturas de malha normalizadas: 4,80 mm; 3,36 mm; 2,80 mm; 2,00 mm; 1,41 mm; 1,00 mm e 500 µm, limpas, secas e taradas com precisão de 0,01 g, um fundo também tarado e uma tampa, as peneiras foram colocadas sobre um agitador mecânico de peneiras padrão, do fabricante Bertel, modelo padrão.



Figura 14: Copo calibrador de volume 1 L, balança digital com precisão de 0,01 g, agitador mecânico e conjunto de peneiras.

O procedimento de preparação da amostra de fertilizante para a medição do GSI se iniciou com a coleta de uma amostra de pelo menos 450 g do produto a ser testado seguida da divisão da amostra por quarteação, e reserva de metade do material para a determinação do índice.

Depois de pesada e reservada, a amostra é colocada na parte superior do conjunto de peneiras, o qual tem as peneiras encaixadas umas sobre as outras, em ordem crescente de abertura de malha, ficando a de malha mais aberta em cima e o produto colocado sobre ela. Após esta etapa, o conjunto é tampado e fixado no agitador mecânico, deixando o mesmo em processo de agitação durante o período de 10 minutos.

Terminado o processo de agitação, as peneiras e o fundo foram pesados separadamente com precisão de 0,01 g, e em seguida foram calculadas as frações de material retido em cada uma delas. As frações medidas foram utilizadas para calcular o percentual em massa do material passante em cada peneira pelas expressões de acordo com as equações 4 a 7 apresentadas a seguir.

$$\text{Porcentagem da amostra passante na 1ª peneira (superior)} = 100 - \left(\frac{100R_1}{G} \right) \quad (\text{Equação 4})$$

$$\text{Porcentagem da amostra passante na 2ª peneira} = 100 - \left[\frac{100(R_1+R_2)}{G} \right] \quad (\text{Equação 5})$$

$$\text{Porcentagem da amostra passante na 3ª peneira} = 100 - \left[\frac{100(R_1+R_2+R_3)}{G} \right] \quad (\text{Equação 6})$$

$$\text{Porcentagem da amostra passante na Nª peneira (inferior)} = 100 - \left[\frac{100(R_1+\dots+R_n)}{G} \right] \quad (\text{Equação 7})$$

Em que:

G = massa da amostra analisada, em gramas.

R₁ = massa da fração retida na 1ª peneira especificada, em gramas.

R₂ = massa da fração retida na 2ª peneira especificada, em gramas.

R₃ = massa da fração retida na 3ª peneira especificada, em gramas.

R_N = massa da fração retida na Nª peneira especificada (quando houver), em gramas.

Com a determinação das porcentagens passantes em cada uma das peneiras, foi utilizada a Equação 2 para o cálculo do GSI. Os parâmetros D₁₆, D₅₀, e D₈₄, são valores intermediários e calculados a partir das Equações 8, 9 e 10, apresentadas a seguir.

$$D_{84} = P_{84} + \left(\frac{\%RP_{84} - 84}{\%RP_{84} - \%RPM_{84}} \right) \cdot (PM_{84} - P_{84}) \quad (\text{Equação 8})$$

$$D_{50} = P_{50} + \left(\frac{\%RP_{50} - 50}{\%RP_{50} - \%RPM_{50}} \right) \cdot (PM_{50} - P_{50}) \quad (\text{Equação 9})$$

$$D_{16} = P_{16} + \left(\frac{\%RP_{16} - 16}{\%RP_{16} - \%RPM_{16}} \right) \cdot (PM_{16} - P_{16}) \quad (\text{Equação 10})$$

Em que:

P84, P50 e P16 = malhas das peneiras, em mm, nas quais as porcentagens acumuladas de partículas, em massa, são iguais ou superiores a 84%, 50 % e 16%, respectivamente.

PM84, PM50 e PM16 = malhas das peneiras, em mm, nas quais as porcentagens acumuladas de partículas, em massa, são iguais ou inferiores a 84%, 50 % e 16%, respectivamente.

%RP84, %RP50 e %RP16 = porcentagens retidas acumuladas nas malhas P84, P50 e P16, respectivamente.

%RPM84, %RPM50 e %RPM16 = porcentagens retidas acumuladas nas malhas PM84, PM 50 e PM16, respectivamente.

Para a determinação da granulometria dos fertilizantes, seguindo o método sugerido pelo fabricante do equipamento distribuidor, utilizou-se um dispositivo de peneiramento, denominado granulômetro, o qual acompanha o conjunto de calibração do equipamento distribuidor e permite classificar uma amostra de produto numa escala de cinco faixas de tamanho de partícula, seguindo o esquema apresentado na Figura 15.

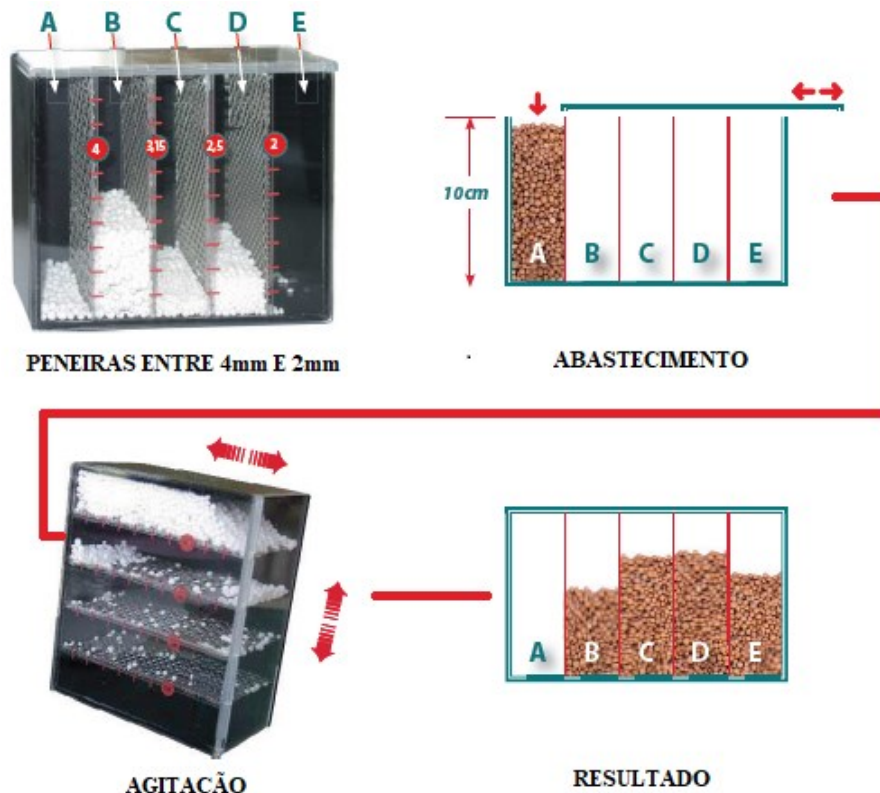


Figura 15: Apresentação e funcionamento do Granulômetro. Fonte: Adaptado de Sulky, 2015.

O dispositivo é composto da caixa principal, que possui tampa superior com abertura calibrada e face frontal transparente escalonada para a leitura do resultado, e 4 peneiras divisoras com aberturas de malha de 4,00 mm; 3,15 mm; 2,50 mm e 2,00 mm que permitem que a caixa fique dividida em 05 compartimentos iguais.

Esse processo de avaliação de granulometria se inicia com a coleta de uma amostra de produto numa quantidade suficiente para encher totalmente o compartimento A do granulômetro. Após a coleta, fecha-se a tampa superior do mesmo e agita-se suavemente o dispositivo nas direções mostradas na Figura 15 até que a passagem de partes da amostra pelas peneiras divisoras se estabilize. Por fim, coloca-se o dispositivo em local plano, de modo que a tampa seja a face superior e com a face transparente virada para frente. Assim, a distribuição granulométrica da amostra é caracterizada da seguinte forma:

- Cavidade A: acomoda partículas com tamanho médio maior que 4,00 mm;
- Cavidade B: acomoda partículas com tamanho médio entre 4,00 mm e 3,15 mm;
- Cavidade C: acomoda partículas com tamanho médio entre 3,15 mm e 2,50 mm;
- Cavidade D: acomoda partículas com tamanho médio entre 2,50 mm e 2,00 mm;
- Cavidade E: acomoda partículas com tamanho médio menor que 2,00 mm;

O resultado é verificado por meio de uma escala numérica, onde é possível fazer a leitura da porcentagem de produto alocada em cada uma das cavidades através da face frontal do granulômetro.

Foram realizadas 5 repetições para cada produto no método padronizado para a caracterização da granulometria e 5 para aquele do fabricante do distribuidor.

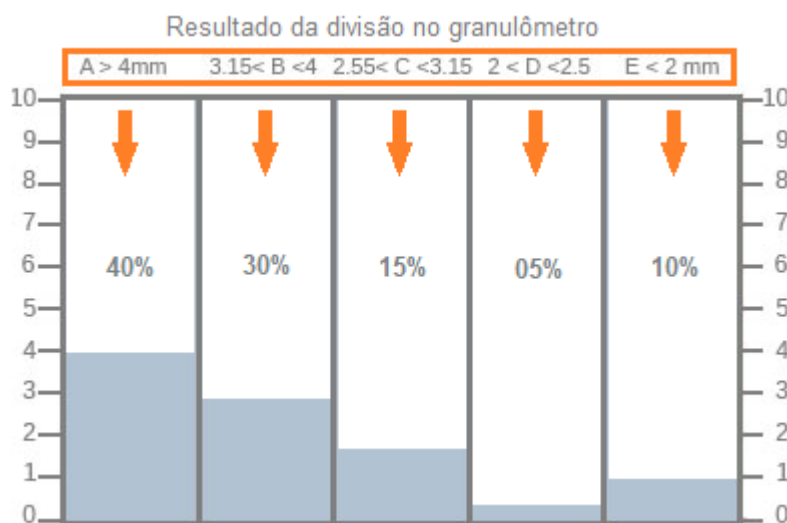


Figura 16: Ilustração da leitura de resultado do teste de granulometria utilizando dispositivo do fabricante do distribuidor. Fonte: Adaptado de Jacto, 2019.

A dureza das partículas foi caracterizada de duas maneiras, uma através do método de medição empírico proposto por Fulton e Port (2016) descrito na revisão, realizado de forma manual e adotando-se o valor médio de trinta repetições para cada um dos produtos. Após a caracterização, os produtos foram classificados seguindo a escala de baixa dureza, média dureza, e alta dureza. Outra de maneira quantitativa, através da compressão da partícula com o uso de uma massa suficientemente grande para esmagar a mesma, e uma balança com

precisão de 0,01 g para aferir a carga em kgf suportada pela partícula até o seu esmagamento.

3.2.2. Etapa II

Para a execução dos testes de aplicação, foi utilizado um distribuidor de fertilizantes sólidos com mecanismo aplicador de dois discos centrífugos do fabricante Jacto®, modelo Uniport 5030NPK, equipamento automotriz, movido por motor diesel de 179 kW. O equipamento possuía sistemas de agricultura de precisão com controlador do modelo Omni 700, e com monitor de controle e operação dos sistemas do veículo e de aplicação Otmis® do modelo OM 4200.



Figura 17: Vistas gerais do distribuidor centrífugo Uniport 5030NPK. Fonte: Banco de imagens - Jacto.

De acordo com o fabricante existem características do sistema de distribuição do equipamento auxiliam na obtenção de uma deposição uniforme do fertilizante, mesmo nas maiores distâncias de lançamento especificadas. Entre eles podem se destacar o posicionamento do produto nos discos, que é realizado próximo das pás e ajustável, sem que haja necessidade de mudar a posição das pás no disco; a geometria das pás com formato que possibilita que o produto tome acelerações diferentes na sua saída, e a rotação dos discos de 810 rpm, maior do que a maioria dos equipamentos de mercado, e que contribui para aumento da distância de lançamento das partículas ao longo da faixa de aplicação.

O posicionamento da queda do produto nos discos durante o ensaio foi mantido fixo na posição 115, o que representa 40% da posição que proporciona máxima aceleração nas partículas, de modo a não inserir distorções indesejadas à distribuição transversal, garantindo que a mudança na energia cinética dada as partículas se desse apenas pela mudança na rotação do mecanismo distribuidor.

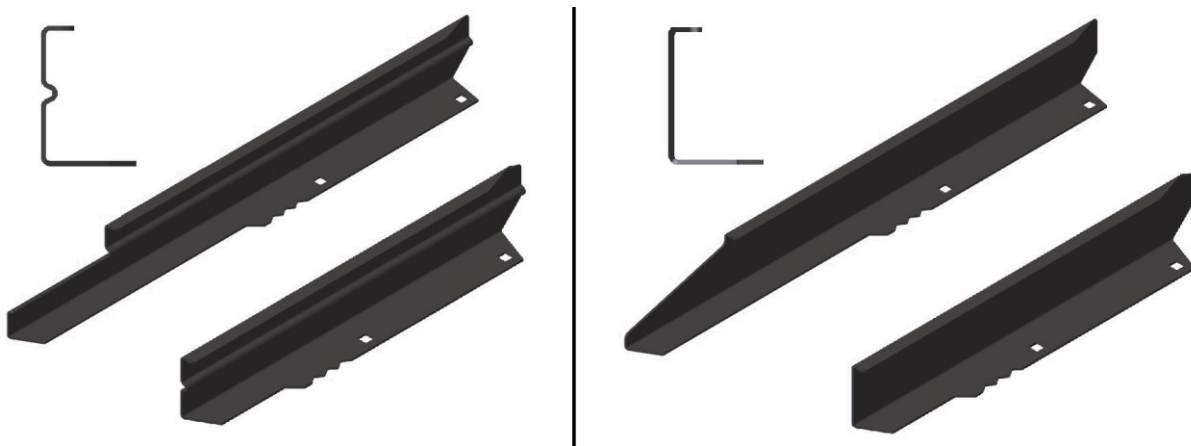


Figura 18: Pás utilizadas no distribuidor centrífugo. A esquerda o conjunto padrão do equipamento, com perfil de condução duplo e a direita o conjunto proposto para contrastar, com perfil de condução simples.

A avaliação do perfil de distribuição transversal foi realizada por meio de coletas de material tomando-se como referência as normas ASAE S341.5 2018 e ISO 5690/1, porém com redução do número de coletas; sendo que, para cada uma das coletas foram adotadas configurações pré-determinadas para as diferentes combinações dos níveis dos fatores de estudo, e com réplica para cada combinação. Foi utilizada a mesma velocidade de deslocamento, de $2,78 \text{ m s}^{-1}$ no equipamento ao longo de todas as aplicações. Os fatores de estudo, bem como os seus níveis, estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5: Fatores e níveis do experimento proposto a campo.

Fator	Níveis	
Produto	GSI < 20	GSI > 25
Dose	150 Kg ha ⁻¹	400 Kg ha ⁻¹
Rotação do mecanismo distribuidor	735 rpm	810 rpm
Pás	Simples	Dupla

As doses foram escolhidas para obter dois níveis distintos de forma que na dose mínima houvesse material suficiente para realizar as análises e que a dose maior não ultrapassasse o limite de controle do equipamento. Foram utilizadas duas rotações no mecanismo distribuidor, uma padrão e outra inferior, mantendo o ponto de posicionamento de produto fixo sobre o disco. Foram utilizados dois conjuntos distintos de pás de distribuição, o original do equipamento e um modelo com geometria simplificada, também visando verificar a diferença entre os dois níveis desse fator.

Parte do protocolo da ISO 5690/1 foi utilizado como diretriz para as avaliações de uniformidade de distribuição e para a coleta das amostras que foram utilizadas na avaliação da segregação ao longo da faixa de aplicação. Na Figura 19 é apresentado o croqui do arranjo físico adotado nas coletas para caracterização do perfil transversal, cabe ressaltar que a linha de início marca a distância de 30 m até a primeira faixa de coletas. Ao passar por esse ponto, o distribuidor se desloca com velocidade constante de $2,78 \text{ m s}^{-1}$, quando é acionado o sistema de aplicação, liberando a queda de produto sobre os discos. Transversalmente ao sentido de deslocamento foram dispostas faixas com bandejas coletoras. Os coletas da mesma faixa foram espaçados de 1,67 m, com exceção dos 4 coletas centrais, os quais ficaram espaçados em 0,5 m entre si; cobrindo assim uma largura de 50 m para cada fileira de coletas. As linhas de coletas foram espaçadas com distância de 18 m entre faixas. Ao

passar pela marca de 50 m após a última linha de coletores, o sistema de aplicação é desligado e assim finaliza-se a deposição que caracteriza uma repetição.



Figura 19: Croqui esquemático da instalação do experimento de campo para testes de uniformidade de distribuição.



Figura 20: Campo experimental instalado para as coletas de material durante os testes de uniformidade de distribuição.

As amostras de produtos depositadas nos coletores em cada repetição foram identificadas e armazenadas em sacos plásticos. É importante destacar as linhas de coletores dispostos no sentido longitudinal ao deslocamento do distribuidor. Para que a análise da segregação ao longo da faixa de aplicação produza um resultado consistente é necessária uma quantidade maior de material depositado em cada posição transversal ao longo da faixa de aplicação, em comparação àquela necessária para uma análise de uniformidade do perfil transversal apenas levando em consideração a massa. A utilização dessa disposição experimental para os coletores, acumulando o material dos coletores de mesma posição transversal em uma mesma repetição, possibilitou obter material suficiente para as análises.

3.2.2.1. Teste de uniformidade ISO 5690/1 com número reduzido de coletores

O protocolo proposto pela ISO 5690/1 é o método oficial para a medição da uniformidade de distribuição à campo em aplicações de fertilizantes sólidos. Ele demanda que toda a faixa de aplicação a ser medida esteja coberta por coletores padronizados. Isso tornaria um experimento com múltiplas combinações, como é o caso dessa pesquisa, inviável. Para suprir a deposição de produto em uma faixa de coleta de 50 m, seriam necessários 201 coletores do padrão 0,25 m x 1,00 m.

Para a coleta de material da pesquisa proposta, foi necessário realizar um número total de 32 coletas válidas, com 50 m de largura e 03 linhas de coletores, e para tal se fez necessária a redução no número de coletores dispostos ao longo da largura de aplicação. Isto foi feito de modo que a diminuição na resolução de construção do perfil de aplicação não afetasse a qualidade da resposta de caracterização da uniformidade de distribuição.

Parish (1999) demonstrou que, a partir de 10 coletores alinhados em pontos equidistantes ao longo da faixa de aplicação a ser medida, é possível mensurar a uniformidade de distribuição de uma aplicação de fertilizantes sólidos.

Nesta pesquisa, o número de coletores na direção transversal foi reduzido em comparação à resolução proposta pela ISO 5690/1. Considerando a faixa transversal de medição de 50 m, seriam necessários 201 coletores. Com a redução foram utilizados, em cada linha de coleta, 32 coletores dispostos à 1,67 m de distância um do outro, num total de 96. Tal estratégia de redução no número de coletores dispostos transversalmente, foi utilizada por Fulton et al, 2013 em uma pesquisa com segregação em aplicações de fertilizantes utilizando distribuidor centrífugo de dois discos, apresentando resultados consistentes na determinação de C.V. transversal em massa total e por nutriente.

Para verificar a consistência dos resultados de CV para a opção metodológica apresentada por Fulton et al, 2013, foram realizadas simulações com dados de coletas realizadas com o número total de coletores propostos pela ISO 5690/1, posteriormente reduzindo-os virtualmente para a construção da curva de C.V. ao longo da faixa de aplicação, mantendo-se apenas os pontos de interesse, de modo a representar a quantidade reduzida de coletores.

Para tal simulação, utilizou-se de dados históricos de avaliações do perfil transversal de distribuição, realizadas com o mesmo mecanismo distribuidor que foi utilizado na atual pesquisa, mas aplicando três produtos. Foram utilizados dados referentes a testes com cloreto de potássio (KCl), ureia e uma mistura de grânulos (36-00-12); as coletas foram realizadas em propriedades rurais no município de Rondonópolis - MT durante o ano de 2016.



Figura 21: Preparação do campo experimental para as avaliações de Uniformidade de distribuição. Rondonópolis MT. Fonte: Máquinas Agrícolas Jacto S/A - 2016.

A compilação dos dados para os cálculos de C.V. e perfil de distribuição nas distintas aplicações foram realizadas com o auxílio do software Adulânço 3.1 (Molin et al, 2015). Os resultados encontrados nas simulações de redução no número de coletores estão dispostos a seguir, bem como os resultados originais das avaliações.

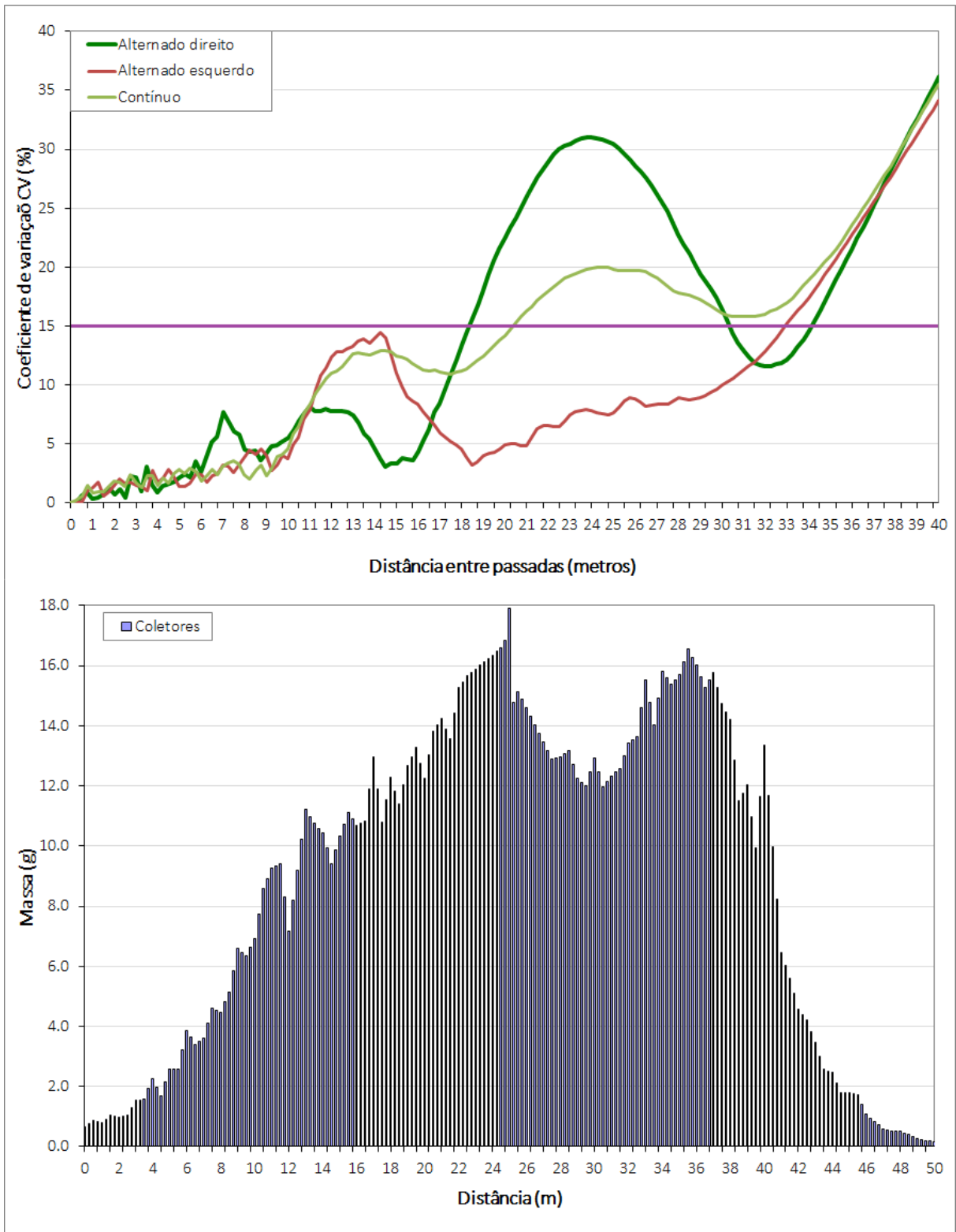


Figura 22: Curva de C.V. e perfil transversal de distribuição para aplicação do produto Cloreto de Potássio (KCl) com largura útil de 32 m. Leitura realizada com os coletores dispostos em intervalos de 0,5 m entre si.

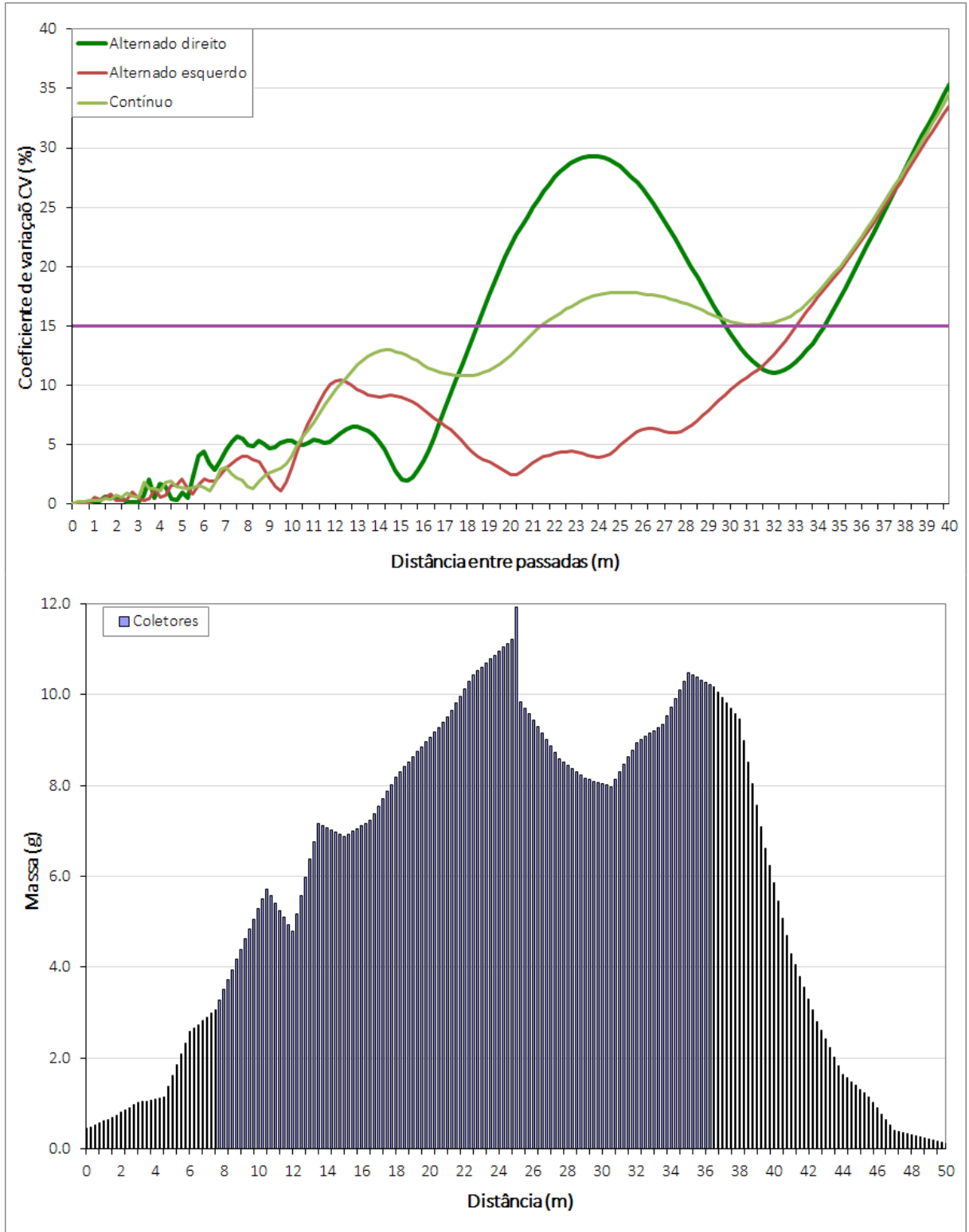


Figura 23: Curva de C.V. e perfil transversal de distribuição para aplicação do produto Cloreto de Potássio (KCl) com largura útil de 32 m. Leitura realizada com os coletores dispostos em intervalos de 1,67 m entre si.

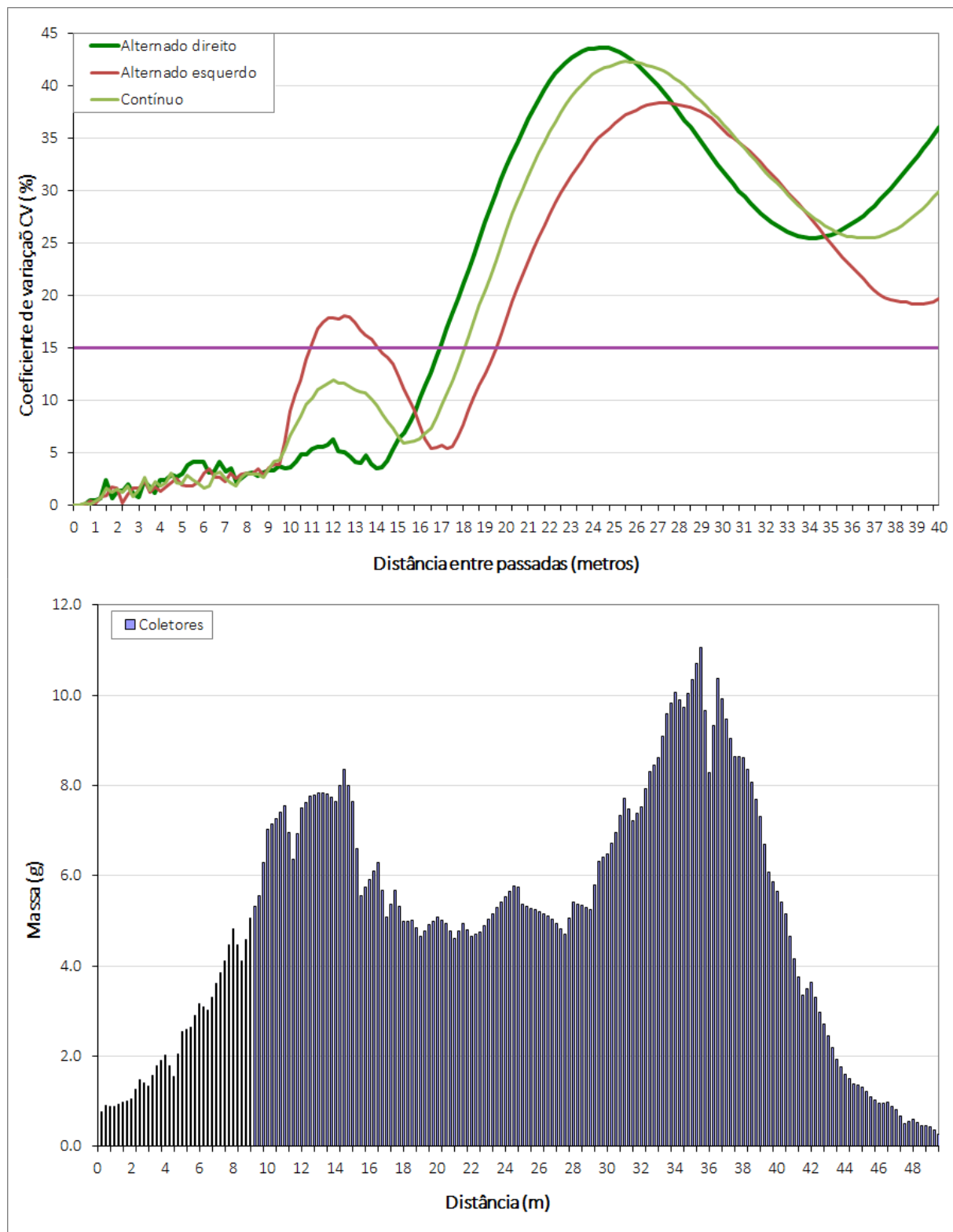


Figura 24: Curva de C.V. e perfil transversal de distribuição para aplicação do produto Ureia com largura útil de 36 m. Leitura realizada com os coletores dispostos em intervalos de 0,5 m entre si.

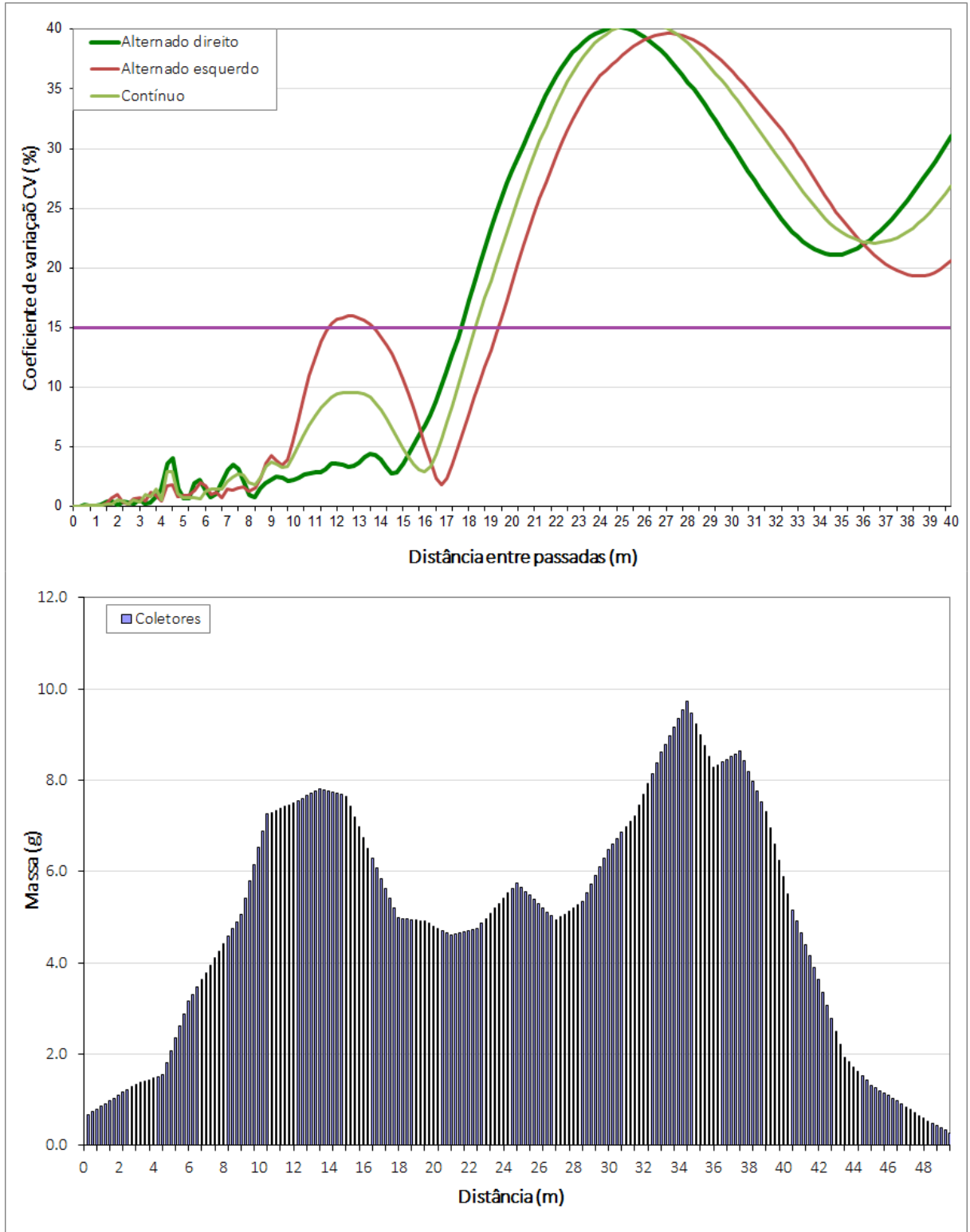


Figura 25: Curva de C.V. e perfil transversal de distribuição para aplicação do produto Ureia com largura útil de 36 m. Leitura realizada com os coletores dispostos em intervalos de 1,67 m entre si.

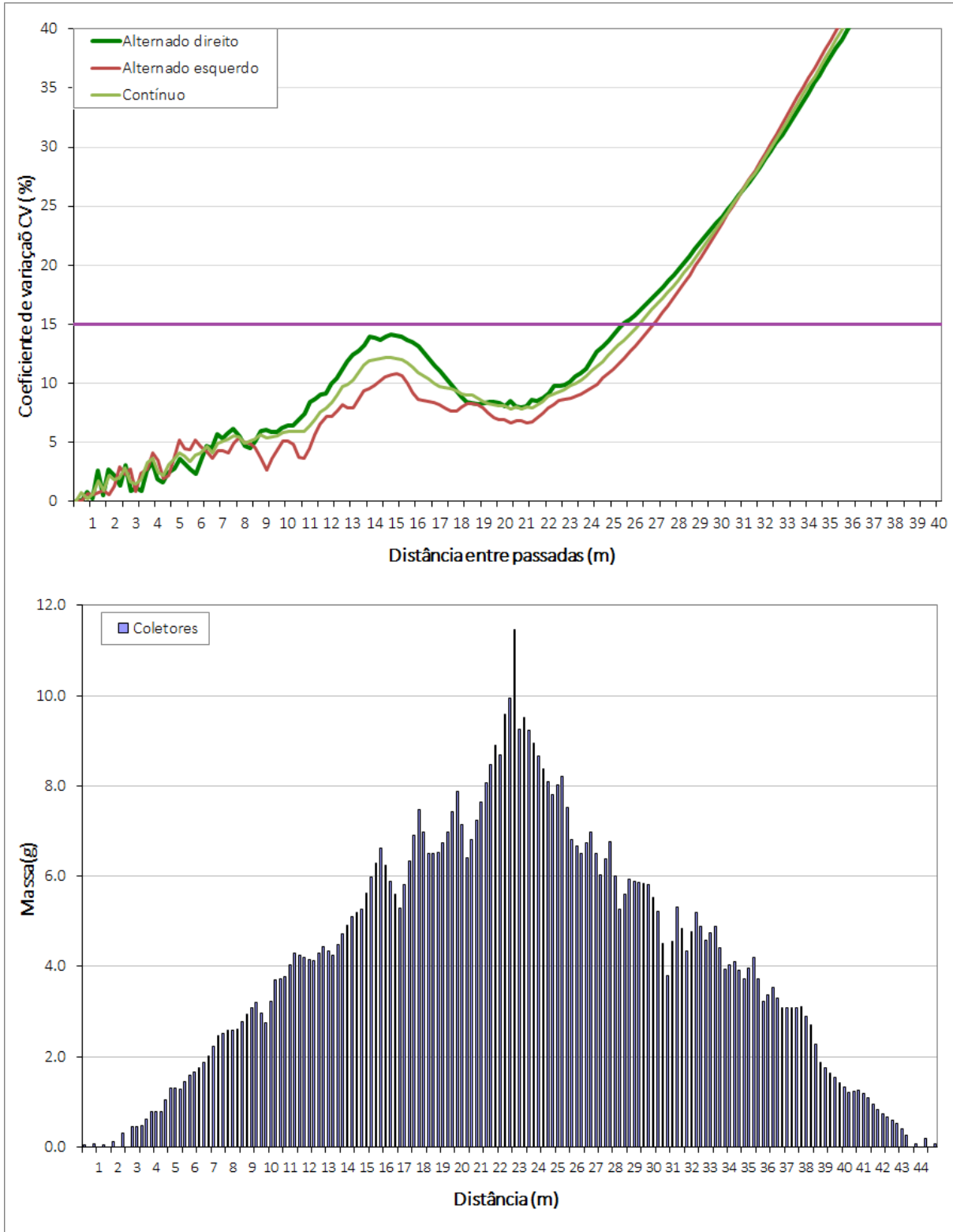


Figura 26: Curva de C.V. e perfil transversal de distribuição para aplicação do produto 36-00-12 com largura útil de 26 m. Leitura realizada com os coletores dispostos em intervalos de 0,5 m entre si.

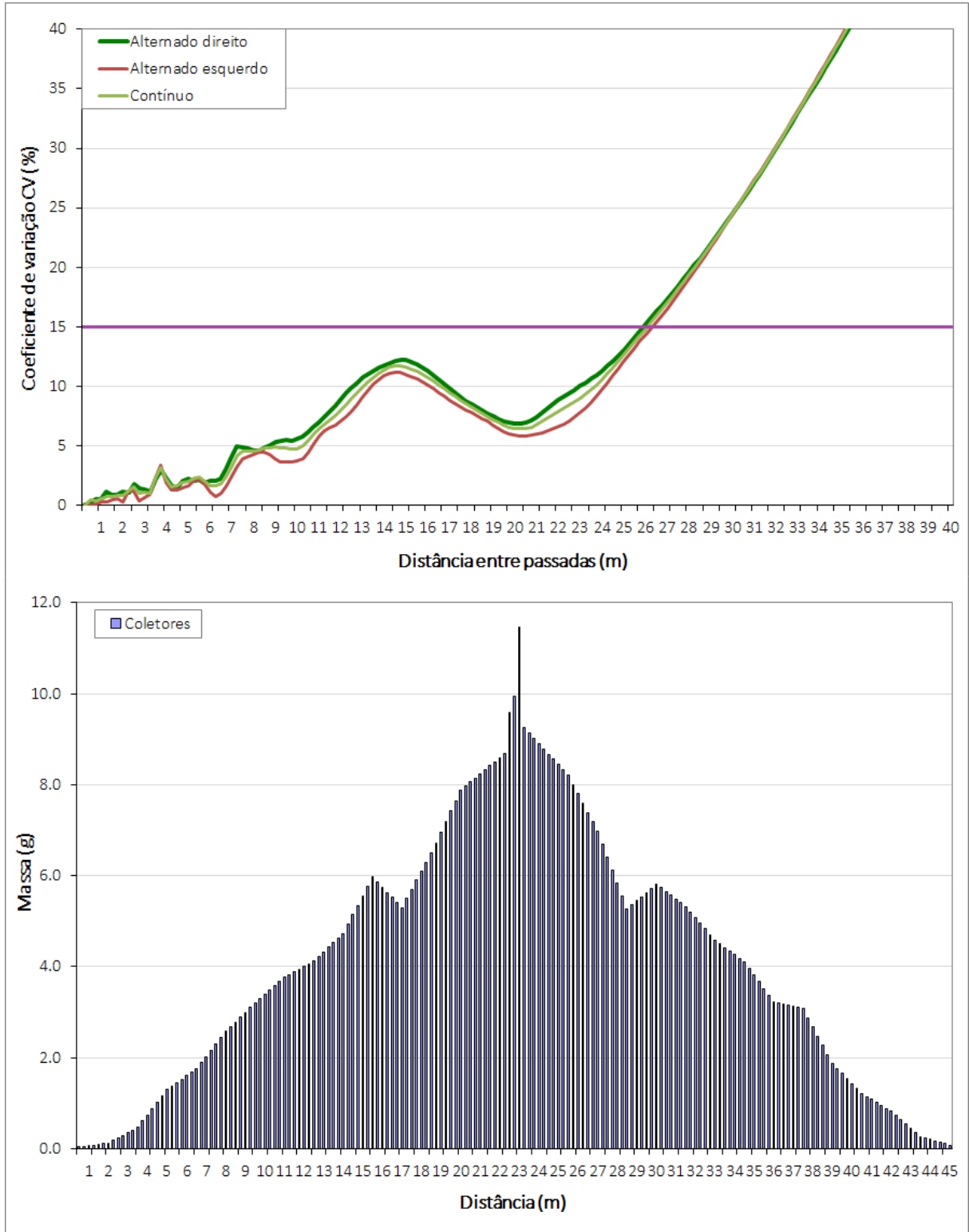


Figura 27 Curva de C.V. e perfil transversal de distribuição para aplicação do produto 36-00-12 com largura útil de 26 m. Leitura realizada com os coletores dispostos em intervalos de 1,67 m entre si.

Os resultados foram equivalentes quando analisado o conjunto de dados completo e o conjunto de dados simulando a retirada de coletores. Conforme apresentado na Tabela 6 as decisões tomadas quanto à classificação da qualidade de distribuição seriam as mesmas independentemente da estratégia de coleta adotada, em todas as aplicações exemplificadas.

Tabela 6: coeficiente de variação do perfil transversal de três produtos para arranjos de coletores espaçados em 0,5 e 1,67 m.

Produto e Arranjo	C.V. (%)	Alternado direito	Alternado esquerdo	Contínuo
KCl – 32 m – esp. 0,5 m		12,37	12,37	15,88
KCl – 32 m – esp. 1,67 m		12,06	12,06	15,20
Ureia – 36 m – esp.0,5 m		26,58	23,19	25,67
Ureia – 36 m – esp.1,67 m		22,31	22,31	22,31
36-00-12 – 26 m – esp. 0,5 m		15,77	13,20	14,64
36-00-12 – 26 m – esp. 1,67 m		15,17	14,30	14,83

3.3. Processamento e análise dos dados experimentais

Este tópico apresenta a forma em que as informações adquiridas durante as etapas I e II da coleta de dados foram processadas, assim como as ferramentas utilizadas para o processo de análise dos dados.

3.3.1. Caracterização dos fertilizantes

Com os dados coletados na etapa I e utilizando os valores de referência identificados na literatura, os produtos foram classificados quanto à sua conformidade para aplicação à lanço.

Tabela 7: Critérios de classificação para as propriedades físicas dos fertilizantes. Fontes: Adaptado de Alcarde, 2007. Fulton & Port, 2016. MAPA, 2014.

Densidade (kg m ⁻³) / Granulometria (GSI) / Dureza (kgf grão ⁻¹)		
Até 800 / 20 / 1,4	Entre 800 e 1000 / 20 e 25 / 1,4 e 2,3	Acima de 1000 / 25 / 2,3
Baixo	Médio	Alto

A Tabela 7 apresenta uma classificação das propriedades físicas de interesse na pesquisa para os fertilizantes. Avaliando tal classificação de modo a buscar obter a maior distância de lançamento possível com a menor intensidade de segregação possível, a interpretação para densidade e dureza é de melhor para nível alto e para granulometria (GSI) melhor um nível baixo.

3.3.2. Determinação da largura da faixa com base no coeficiente de variação do perfil transversal.

A combinação dos fatores em estudo, apresentados na tabela 5, gerou 16 combinações que foram repetidas 2 vezes para a obtenção de 32 amostras.

O material coletado em cada uma das três linhas transversais de coletores a cada repetição foi pesado individualmente e as massas depositadas nos coletores foram ordenadas em planilha eletrônica de modo que cada posição transversal ao longo da largura de aplicação ficasse representada corretamente, conforme estava no campo experimental. Devido ao

número de 32 coletores adotados em cada linha, obteve-se 32 pontos de observação por linha de coletores.

As massas devidamente medidas e identificadas conforme a posição transversal referente, foram inseridas no software Adulção 3.1 para a obtenção do gráfico do perfil transversal de deposição e para o cálculo do C.V. do material depositado para diversas larguras simuladas de aplicação. No software, os gráficos gerados são semelhantes aos das Figura 22, Figura 24 e Figura 26.

Para a escolha da faixa de aplicação adotada para cada tratamento do ensaio, após a determinação da curva de C.V. com o auxílio computacional do Adulção 3.1, foi selecionada a maior faixa de aplicação que seguramente apresentasse C.V. de 15% em regime de tráfego alternado, medida de referência amplamente difundida na literatura (CROZIER & ROBERSON, 2014; MILAN e GALDANHA JR, 1996; YULE e PEMBERTON, 2009).

3.3.3. Determinação da segregação nas faixas

O material depositado nos coletores para cada combinação dos fatores, foi submetido, após a pesagem total, ao peneiramento e pesagens parciais para que fosse possível determinar o GSI conforme método descrito na seção 3.2.1 em cada posição transversal ao longo da largura de coleta. Os coletores de mesma posição transversal, mas em linhas diferentes, tiveram o material depositado agrupado, gerando-se virtualmente uma única linha transversal de coletores, para possibilitar a determinação do GSI mesmo nas posições transversais que tiveram menor quantidade de material depositado.

O GSI medido para cada posição transversal foi utilizado como parâmetro de determinação da intensidade de segregação, seguindo a interpretação descrita na Tabela 4. Adotando como largura útil de trabalho aquela com C.V. de 15%, foi realizada a simulação da sobreposição do GSI correspondente à mesma largura, obtendo-se dessa forma a medida da intensidade de segregação através do parâmetro GSI ao longo da faixa de aplicação com sobreposição, para cada uma das combinações do experimento.

3.3.4. Identificação dos efeitos e associação de fatores

As informações geradas durante a etapa II de coleta de dados, após o processamento apresentado nas seções 3.3.2 e 3.3.3, foram submetidas a análises para tornar possível a identificação de efeitos causados pelos fatores selecionados para a pesquisa, tanto de forma isolada quanto combinada.

As avaliações do perfil transversal de distribuição para determinação da faixa de aplicação útil a um C.V. de 15% e para a intensidade de segregação através do índice GSI, foram organizadas de forma gráfica, para tornar possível a comparação qualitativa entre os diferentes tratamentos com as repetições, e também para expor de forma clara a faixa de aplicação e o comportamento do C.V. resultante, assim como demonstrar a segregação na faixa de aplicação resultante para cada um dos tratamentos e repetições.

Para que fosse possível avaliar a interação entre fatores, foi utilizado um delineamento experimental fatorial inteiramente casualizado por meio das análises de variância. Para aqueles fatores e interações que apresentaram diferença estatística na análise da variância, foi aplicado teste de Tukey, e assim foram identificadas a ocorrência de efeito e seu eventual efeito sobre as médias. Desta forma foram identificados os parâmetros para o produto e equipamento que proporcionaram a maior faixa de aplicação, respeitando o CV de

15%, bem como aqueles que proporcionaram uma menor intensidade na segregação na faixa de trabalho.

Os resultados encontrados nas avaliações estatísticas univariada foram combinados com uma avaliação de agrupamento multivariada, considerando os fatores do experimento juntamente com as respostas faixa de aplicação e segregação, de modo a ser possível identificar os níveis otimizados dos fatores e das interações. Assim buscou-se identificar o ajuste que permita aplicação na maior faixa de aplicação com uniformidade de distribuição e baixo índice de segregação. As ferramentas utilizadas para auxiliar as análises estatísticas propostas para a pesquisa foram os softwares Minitab 18® e SAS Studio®

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados estão organizados de modo a apresentar as propriedades físicas dos fertilizantes utilizados no experimento, na sequência as faixas úteis de aplicação com sobreposições simuladas em tráfego alternado. Em seguida a segregação granulométrica na faixa de aplicação e enfim dentro da faixa de aplicação. Para os parâmetros de resposta faixa de aplicação e segregação granulométrica, foram avaliadas as influências dos fatores e suas interações utilizando-se de ferramentas estatísticas.

4.1. Caracterização das propriedades físicas dos fertilizantes utilizados

Na Tabela 8 são apresentados os valores mensurados e calculados para diversas propriedades físicas dos fertilizantes utilizados no trabalho.

Tabela 8: Propriedades físicas dos fertilizantes utilizados na pesquisa.

Produto	Densidade ¹	σ Densid.	GSI	σ GSI	SGN	σ SGN	Dureza ²	σ Dureza
13-00-36 (A)	1000	30	33,82	1,14	309,37	4,54	3,19	1,93
27-00-00 (B)	970	60	16,29	1,32	389,37	4,50	4,72	0,85

1 Densidade – Kg m⁻³ / 2 Dureza – Kgf grão⁻¹

Adotando os critérios estabelecidos na Tabela 8 para classificar os produtos escolhidos quanto às propriedades físicas importantes para a sua aplicação a lanço, observou-se que os produtos possuem densidade adequada para atingir faixas de aplicação maiores, a dureza média dos produtos é adequada, porém o produto 13-00-36, doravante denominado produto A, tem uma variação grande nessa propriedade, o que indica que uma porção considerável de partículas podem ser danificadas durante a aplicação. Com relação ao GSI, o produto 27-00-00, doravante denominado produto B, apresentou valores melhores, o que era esperado dado que se trata de um produto puro. A diferença obtida no GSI entre os produtos assegura que este fator teve características granulométricas bastante distintas.

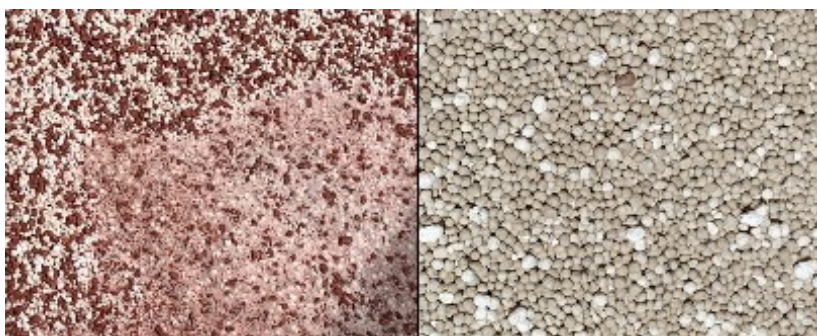


Figura 28: Produtos escolhidos para o experimento. A esquerda a fórmula 13-00-36 (A) uma mistura de grânulos e a direita o produto 27-00-00 + Mg (B) mistura de nitrogênio, cálcio e magnésio no grânulo.

A granulometria dos produtos mensurada pelo método alternativo, sugerido pelo fabricante do distribuidor centrífugo é apresentada na Figura 29.

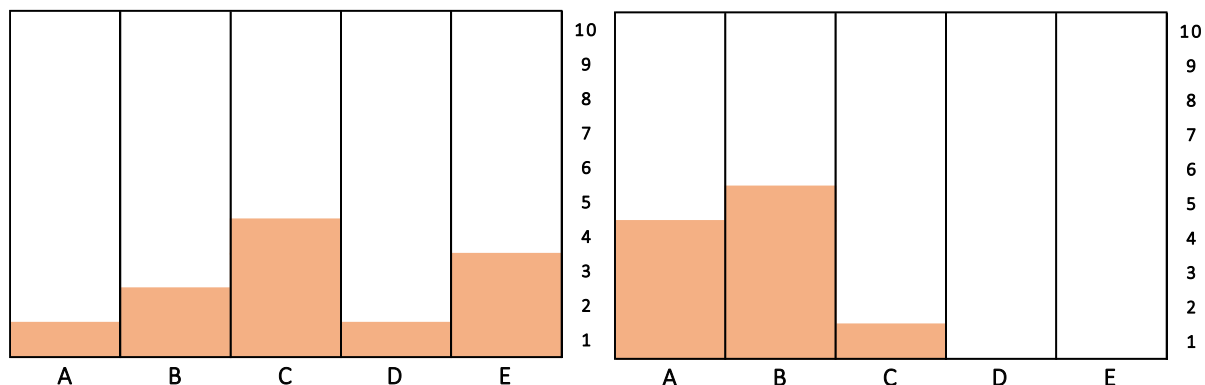


Figura 29: Distribuições granulométricas para o produto 13-00-36 a esquerda e 27-00-00 a direita. Divisão das cavidades por tamanho de partícula sendo A (<4,00 mm), B (3,15 mm – 4,00 mm), C (2,50 mm – 3,15 mm), D (2,00 mm – 2,50 mm) e E (>2,00 mm)

4.2. Determinação da faixa de aplicação através de C.V. em massa

A identificação dos tratamentos utilizados no experimento com a configuração dos níveis dos fatores e a faixa de aplicação com C.V. de 15% estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Identificação e configuração dos fatores para as repetições. Faixa de aplicação de trabalho para C.V. de 15%

Identificação	Fatores				*Faixa (m)
	Produto	Pá	Velocidade (rpm)	Dose (kg/ha)	
A/DUP/810/150	13-00-36	Dupla	810	150	29,00
A/DUP/810/400	13-00-36	Dupla	810	400	28,00
A/DUP/735/150	13-00-36	Dupla	735	150	25,00
A/DUP/735/400	13-00-36	Dupla	735	400	27,00
B/DUP/810/150	27-00-00	Dupla	810	150	36,00
B/DUP/810/400	27-00-00	Dupla	810	400	34,00
B/DUP/735/150	27-00-00	Dupla	735	150	22,50
B/DUP/735/400	27-00-00	Dupla	735	400	25,50
A/SIMP/810/150	13-00-36	Simples	810	150	25,50
A/SIMP/810/400	13-00-36	Simples	810	400	25,50
A/SIMP/735/150	13-00-36	Simples	735	150	24,50
A/SIMP/735/400	13-00-36	Simples	735	400	28,00
B/SIMP/810/150	27-00-00	Simples	810	150	31,00
B/SIMP/810/400	27-00-00	Simples	810	400	31,00
B/SIMP/735/150	27-00-00	Simples	735	150	21,00
B/SIMP/735/400	27-00-00	Simples	735	400	20,00

* Parâmetro de resposta faixa apresentado é a média de duas repetições que possuem a mesma combinação.

Nas Figuras 30, 31, 32 e 33 estão apresentadas as curvas de C.V. em função de larguras simuladas considerando tráfego alternado. As curvas para as 32 amostras estão em 4

figuras, agrupadas por produto e tipo de pá. Dentro de cada uma das figuras, são variadas a dose e a rotação do mecanismo distribuidor.

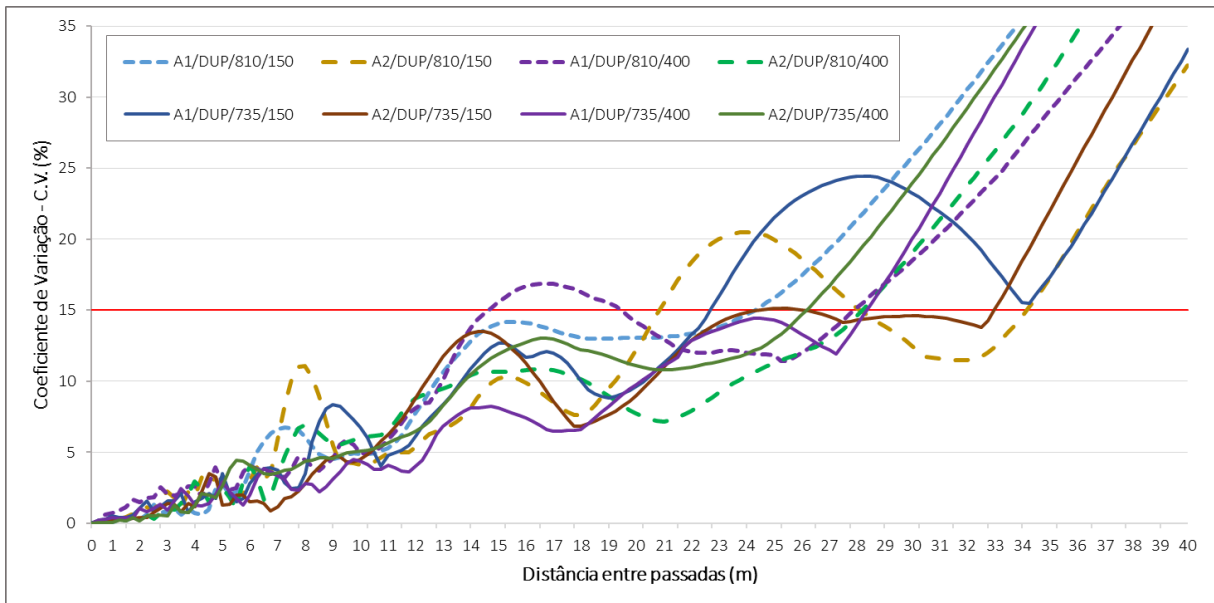


Figura 30: Coeficiente de variação (C.V.) para sobreposições simuladas em diferentes larguras. Cada tratamento teve duas repetições (1) e (2) com o mesmo produto aplicado (A), o mesmo tipo de pá foi utilizado no disco (DUP). Foram variadas a rotação do mecanismo distribuidor (810) e (735), bem como a dose (150) e (400).

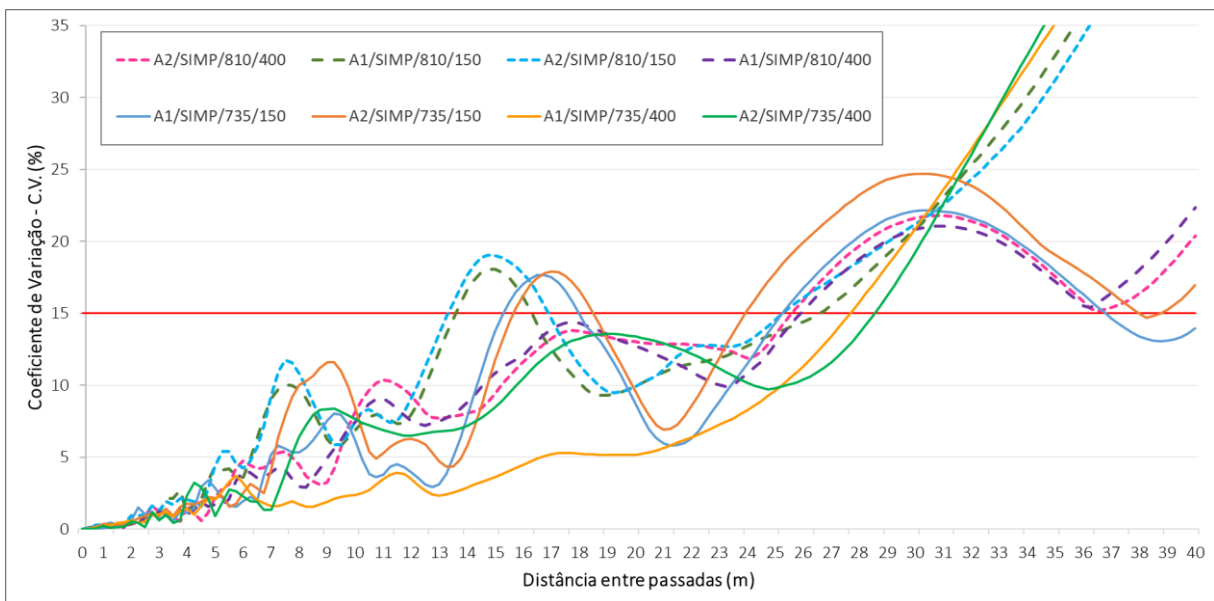


Figura 31: Coeficiente de variação (C.V.) para sobreposições simuladas em diferentes larguras. Cada tratamento teve duas repetições (1) e (2) com o mesmo produto aplicado (A), o mesmo tipo de pá foi utilizado no disco (SIMP). Foram variadas a rotação do mecanismo distribuidor (810) e (735), bem como a dose (150) e (400).

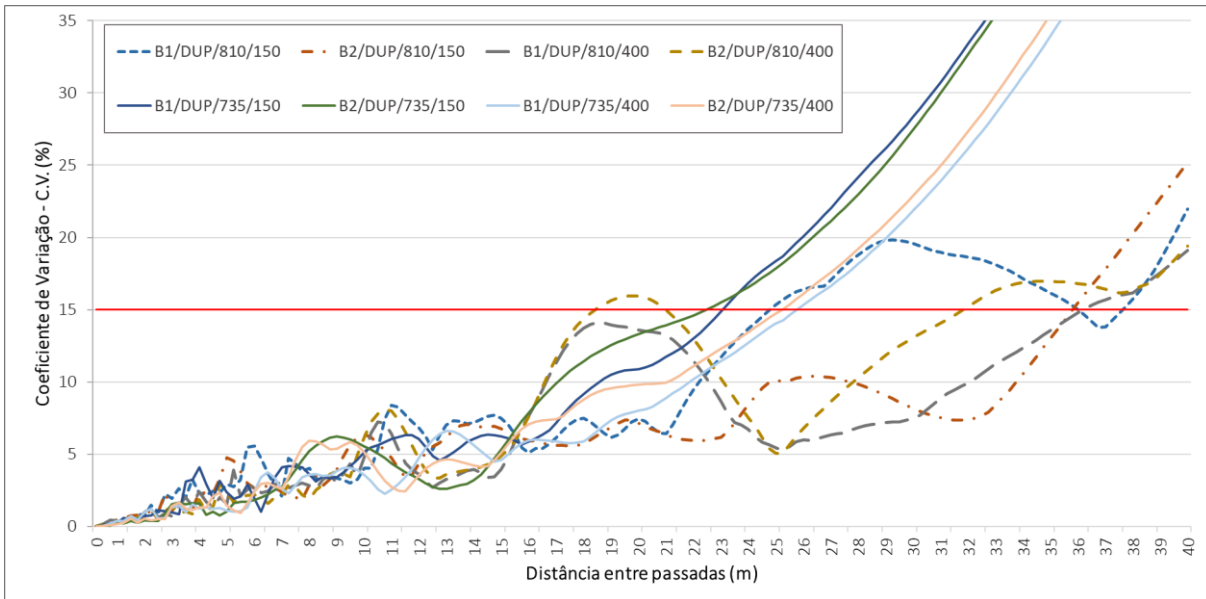


Figura 32: Coeficiente de variação (C.V.) para sobreposições simuladas em diferentes larguras. Cada tratamento teve duas repetições (1) e (2) com o mesmo produto aplicado (B), o mesmo tipo de pá foi utilizado no disco (DUP). Foram variadas a rotação do mecanismo distribuidor (810) e (735), bem como a dose (150) e (400).

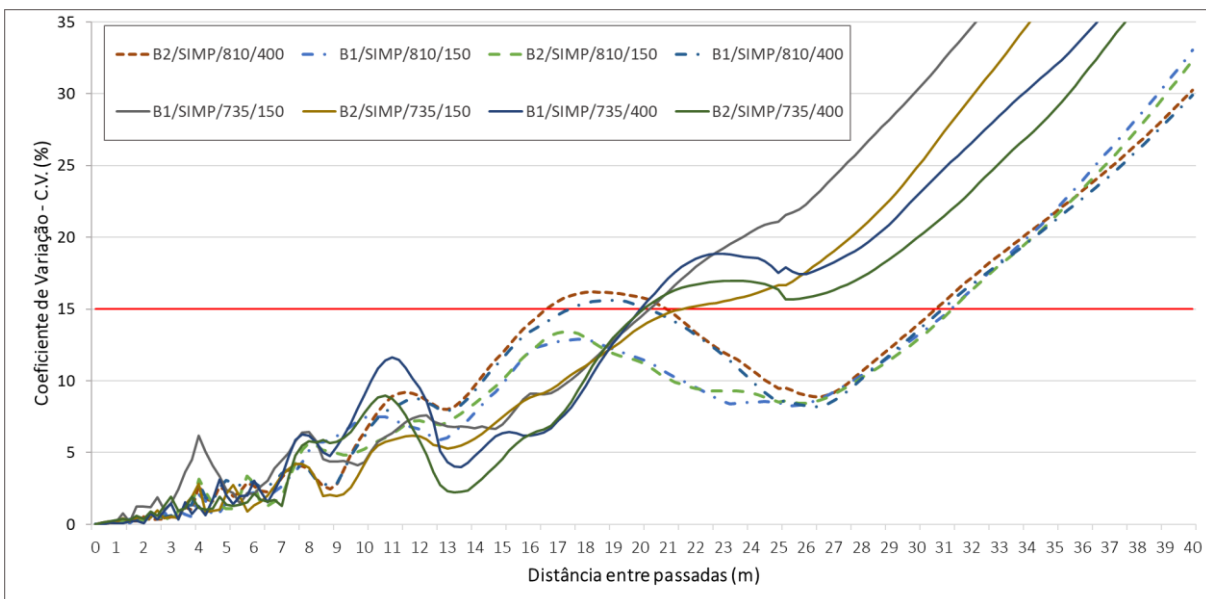


Figura 33: Coeficiente de variação (C.V.) para sobreposições simuladas em diferentes larguras. Cada tratamento teve duas repetições (1) e (2) com o mesmo produto aplicado (B), o mesmo tipo de pá foi utilizado no disco (SIMP). Foram variadas a rotação do mecanismo distribuidor (810) e (735), bem como a dose (150) e (400).

A estratégia de basear-se nas normas ISO 5.690/1 e ASAE S341.5, e propor utilizar um número reduzido de coletores para fazer deposição do material em campo e posteriormente tratar os dados para a medição da faixa de aplicação útil, mais tradicional, e para a determinação do GSI ao longo da faixa, se mostrou válida e eficiente, de modo que foi possível levantar as curvas de coeficiente de variação apresentadas acima. Lawrence et al. (2006) já haviam demonstrado que, estabelecendo-se um método padronizado para a coleta de material durante a avaliação da distribuição transversal e mantendo-o em todas os tratamentos, os resultados serão confiáveis.

A Tabela 10 apresenta os resultados da análise de variância. O quadro apresentado mostra que as pás e rotação do mecanismo distribuidor isoladamente e a interação entre o

produto e rotação do mecanismo distribuidor provocam efeito sobre a faixa de aplicação, estejam eles isolados ou com suas combinações.

Tabela 10: Análise de variância para faixa de aplicação útil com C.V. de 15%.

Causas de variação sobre a resposta Faixa de Aplicação	G.L.¹	S.Q.²	Q.M.³	F-Valor	P-Valor
Modelo	15	580.219	38.681	8.54	0.000
Linear	4	334.375	83.594	18.45	0.000
Produto	1	9.031	9.031	1.99	0.177
Dose	1	2.531	2.531	0.56	0.466
Rotação	1	270.281	270.281	59.65	0.000
Pás	1	52.531	52.531	11.59	0.004
Interações de 2ª ordem	6	229.687	38.281	8.45	0.000
Produto*Dose	1	2.531	2.531	0.56	0.466
Produto* Rotação	1	195.031	195.031	43.04	0.000
Produto*Pás	1	11.281	11.281	2.49	0.134
Dose* Rotação	1	13.781	13.781	3.04	0.100
Dose*Pás	1	0.031	0.031	0.01	0.935
Rotação*Pás	1	7.031	7.031	1.55	0.231
Interações de 3ª ordem	4	10.875	2.719	0.6	0.668
Produto*Dose*Rotação	1	0.781	0.781	0.17	0.683
Produto*Dose*Pás	1	2.531	2.531	0.56	0.466
Produto*Rotação*Pás	1	3.781	3.781	0.83	0.375
Dose*Rotação*Pás	1	3.781	3.781	0.83	0.375
Interações de 4ª ordem	1	5.281	5.281	1.17	0.296
Produto*Dose*Rotação*Pás	1	5.281	5.281	1.17	0.296
Erro	16	72.5	4.531		
Total	31	652.719			

1. Grau de liberdade / 2. Soma de quadrados / 3. Quadrado médio

O teste de Tukey para comparação de médias foi empregado para verificar diferenças dos fatores pás, rotação do mecanismo distribuidor e da interação entre os fatores produto e rotação do mecanismo distribuidor para a resposta faixa de aplicação, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11: Quadro resumo do teste de Tukey a 99% de confiança, aplicado aos fatores de interesse estatístico

Rotação do mecanismo distribuidor		
Níveis	N° repetições	Largura útil (m)
810	16	30,00 B*
735	16	24,19 A
Tipo de pá		
Níveis	N° repetições	Largura útil (m)
Dupla	16	28,38 A
Simples	16	25,81 A
Interação produto e rotação do mecanismo distribuidor		
Níveis	N° repetições	Largura útil (m)
13-00-36 / 735	8	26,13 B
13-00-36 / 810	8	27,00 B
27-00-00 / 735	8	22,25 A
27-00-00 / 810	8	33,00 C

*Médias seguidas de letras maiúsculas diferentes dentro de um mesmo fator ou da combinação de fatores indicam diferença estatística ao nível de 1% segundo o teste de Tukey.

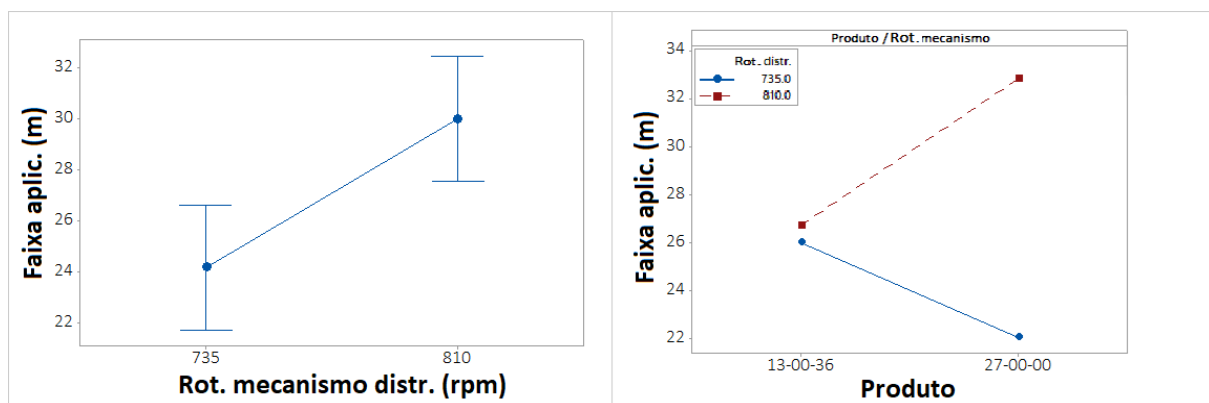


Figura 34: Representação gráfica das médias do fator isolado e interação que resultam em faixa de aplicação estatisticamente diferente, nível de confiança de 99%. No gráfico da esquerda o ponto central indica a média e a linha vertical entre os traços horizontais representam o desvio padrão para a média.

Os resultados mostram que apesar do fator tipo de pá ter efeito, não houve diferença na média das larguras de aplicação. As médias foram estatisticamente diferentes apenas para o fator rotação do mecanismo distribuidor isolado e para a interação entre ele e o fator produto.

Thaper (2014) e Vera (2014) demonstraram diferenças estatísticas válidas em suas pesquisas, tanto para a rotação do mecanismo distribuidor quanto para o tipo de pá utilizada nos discos distribuidores durante avaliações de segregação e uniformidade do perfil transversal de distribuição. Nesta pesquisa não se verificou tal influência do tipo de pá utilizado nos discos distribuidores. Isso comprova que as soluções na forma construtiva do mecanismo distribuidor fazem com que não podem ser analisadas de modo isolado.

4.3. Determinação da segregação na largura útil de trabalho

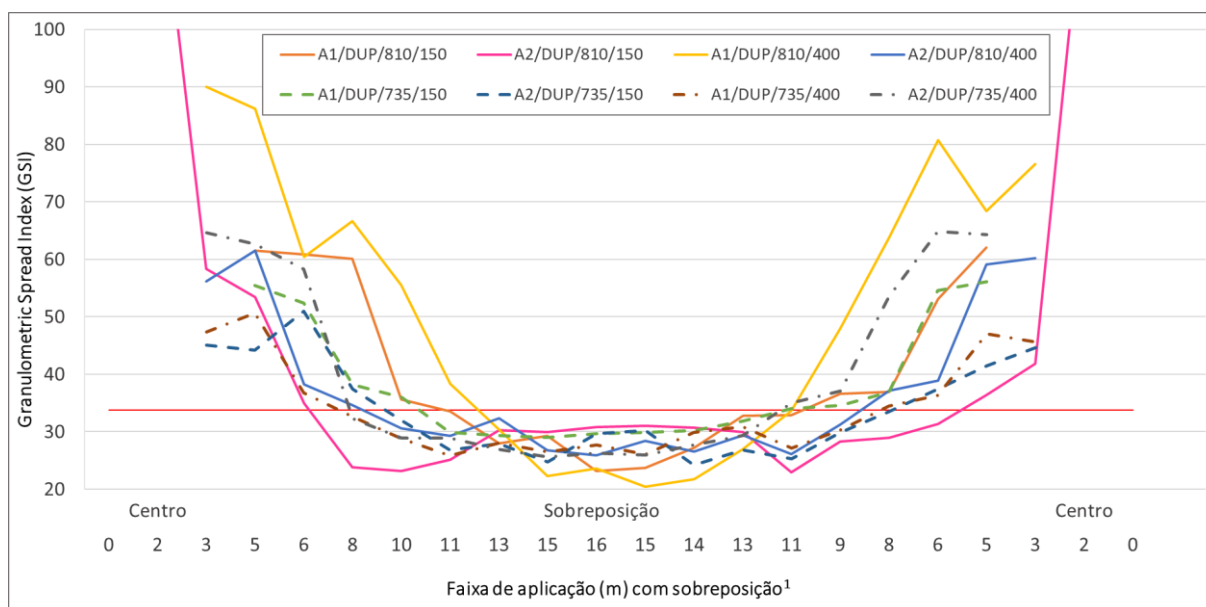
As respostas dos tratamentos utilizados no experimento para a medida do GSI médio sobreposto na faixa de aplicação com C.V. de 15% estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: GSI médio com sobreposição referente a faixa de trabalho considerando C.V. de 15% de cada repetição.

Identificação	*Faixa (m)	*GSI	Identificação	*Faixa (m)	*GSI
A/DUP/810/150	29,00	45,23	A/SIMP/810/150	25,50	49,81
A/DUP/810/400	28,00	44,06	A/SIMP/810/400	25,50	46,89
A/DUP/735/150	25,00	36,02	A/SIMP/735/150	24,50	44,10
A/DUP/735/400	27,00	37,35	A/SIMP/735/400	28,00	39,48
B/DUP/810/150	36,00	17,57	B/SIMP/810/150	31,00	17,91
B/DUP/810/400	34,00	22,66	B/SIMP/810/400	31,00	23,21
B/DUP/735/150	22,50	17,99	B/SIMP/735/150	21,00	15,46
B/DUP/735/400	25,50	18,24	B/SIMP/735/400	20,00	20,59

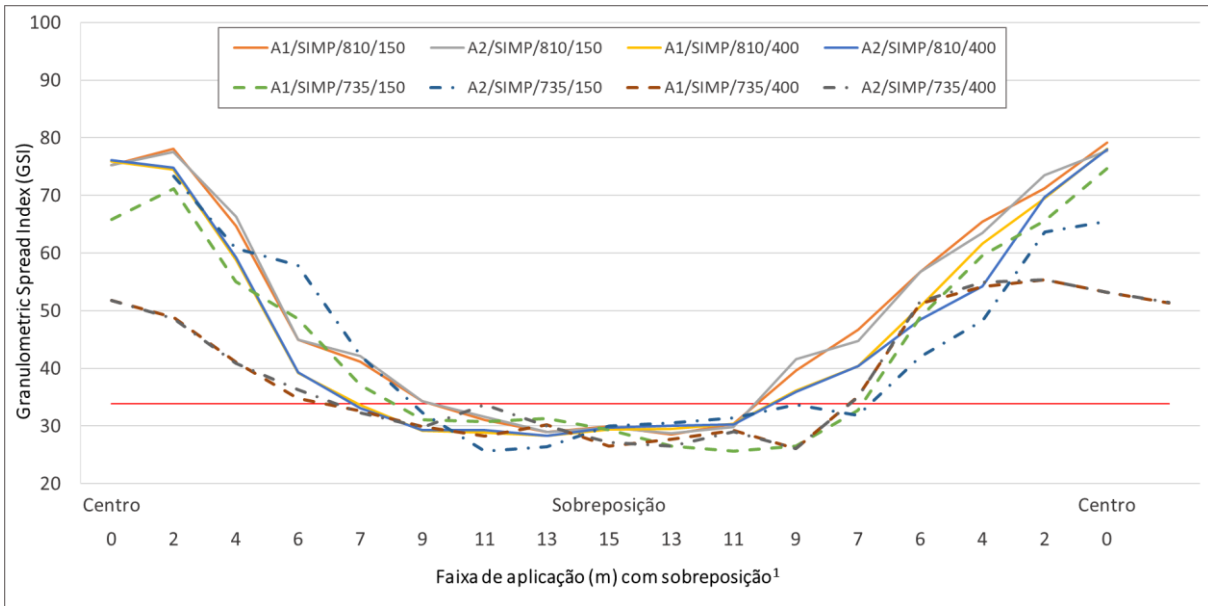
* Parâmetros de resposta faixa e GSI são a média de duas repetições que possuem a mesma combinação.

Além do GSI médio para a faixa de aplicação determinada pelo C.V. em massa, verificou-se o comportamento do GSI ao longo da faixa na região próxima ao centro da passada e naquela extrema, em que ocorre a sobreposição. Os resultados são apresentados nas Figuras 35, 36, 37 e 38.

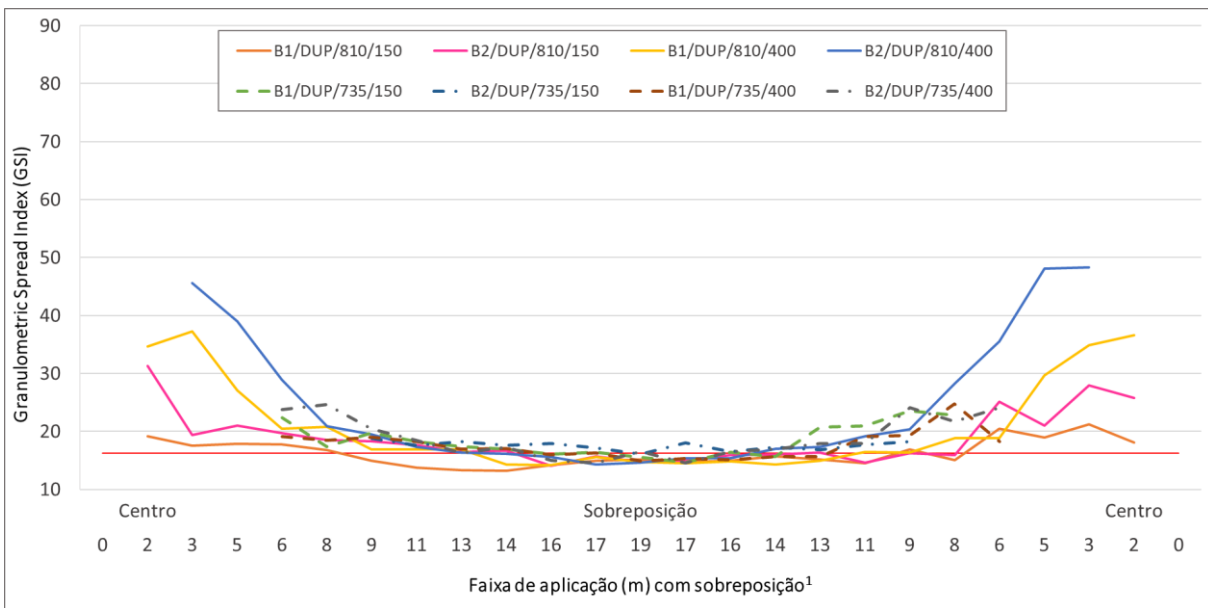


1 As extremidades indicam a passagem do equipamento e na parte central está a região de sobreposição.

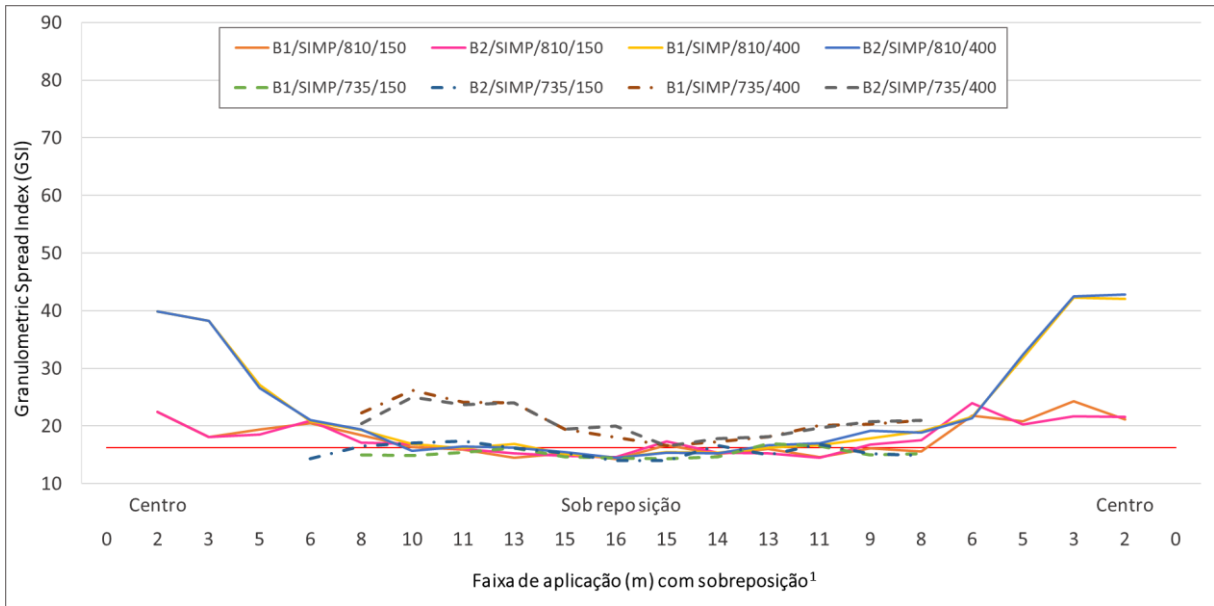
Figura 35: GSI ao longo da faixa de aplicação. As linhas plotadas na figura têm o mesmo produto aplicado (A), o mesmo tipo de pá foi utilizado no disco (DUP). Tiveram variação a rotação do mecanismo distribuidor (810) e (735) e a dose (150) e (400). A linha vermelha representa o GSI do produto antes da aplicação.



1 As extremidades indicam a passagem do equipamento e na parte central está a região de sobreposição.
 Figura 36: GSI ao longo da faixa de aplicação. As linhas plotadas na figura têm o mesmo produto aplicado (A), o mesmo tipo de pá foi utilizado no disco (SIMP). Tiveram variação a rotação do mecanismo distribuidor (810 e 735) e a dose (150 e 400). A linha vermelha representa o GSI do produto antes da aplicação.



1 As extremidades indicam a passagem do equipamento e na parte central está a região de sobreposição.
 Figura 37: GSI ao longo da faixa de aplicação. As linhas plotadas na figura têm o mesmo produto aplicado (B), o mesmo tipo de pá foi utilizado no disco (DUP). Tiveram variação a rotação do mecanismo distribuidor (810 e 735) e a dose (150 e 400). A linha vermelha representa o GSI do produto antes da aplicação.



1 As extremidades indicam a passagem do equipamento e na parte central está a região de sobreposição.
 Figura 38: GSI ao longo da faixa de aplicação. As linhas plotadas na figura têm o mesmo produto aplicado (B), o mesmo tipo de pá foi utilizado no disco (SIMP). Tiveram variação a rotação do mecanismo distribuidor (810) e (735) e a dose (150) e (400). A linha vermelha representa o GSI do produto antes da aplicação.

As extremidades das linhas plotadas são as posições próximas ao centro da passada do equipamento e na parte central do gráfico está a porção em que há sobreposição mais efetiva. As linhas vermelhas horizontais constantes representam o GSI amostrado para os produtos, antes da aplicação. Verifica-se que a intensidade de segregação, medida pelo GSI ao longo da faixa é distinta entre os dois tipos de fertilizantes utilizados.

Tang et al (2002) e Fulton &Port (2016) demonstraram a importância da uniformidade e compatibilidade nas propriedades físicas dos fertilizantes para aplicação a lanço, podendo-se destacar entre elas o GSI. Quando avalia-se as curvas de GSI das Figuras 35, 36, 37 e 38 nota-se que o produto que possui GSI mais baixo, também o apresenta inferior ao longo da faixa aplicada, corroborando as informações encontradas na literatura de que um produto com características físicas mais adequadas para aplicação a lanço apresenta menor segregação.

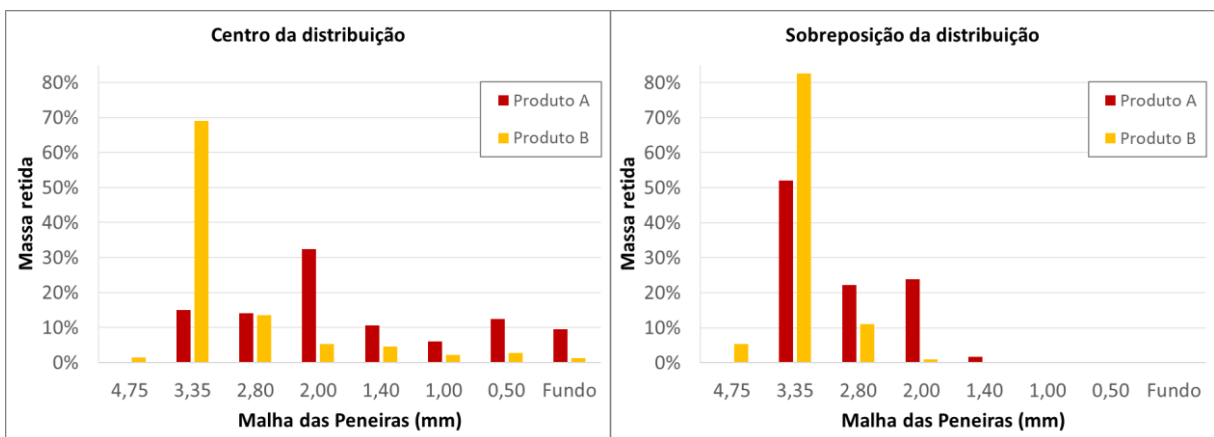


Figura 39: Distribuição relativa da massa retida por tamanho de malha nas peneiras.

A Figura 39 complementa os resultados referentes à segregação, demonstrando como as partículas ficaram distribuídas por tamanho de grão nas regiões distintas do perfil transversal, no centro como a média dos 8 coletores posicionados mais ao centro da

distribuição, e as extremidades, onde há sobreposição das passadas, através da média dos 10 coletores mais afastados, sendo 5 a direita e 5 a esquerda. A média obtida para cada peneira considera a soma de todos os tratamentos que foram ensaiados com um mesmo produto.

O GSI medido em todos os tratamentos se mostrou mais alto na região próxima ao equipamento, ou seja, no centro da faixa de aplicação, do que na região de sobreposição, mostrando que houve presença de quantidade considerável de partículas de tamanhos distintos entre nesta porção da faixa de aplicação, o que levou a se ter maior dispersão no tamanho médio das partículas e por consequência essa medida do GSI mais alto. Hofstee (1990), Tang et al (2002), Heege (2003) apresentam em suas pesquisas que a segregação balística ou granulométrica é influenciada especificamente pela massa das partículas e pelo seu arrasto aerodinâmico, o que leva partículas mais pesadas e com formato mais aerodinâmico a alcançar distâncias de lançamento maiores. Os dados mostraram que essas partículas que possuem boa aptidão para serem lançadas mais distante estão presentes em menor número nos produtos aplicados. Como há menor quantidade de produto chegando nas extremidades da distribuição e essas que chegam até essas posições na largura de aplicação apresentam tamanho uniforme, levam ao GSI medido menor nessa região da faixa.

Os efeitos sobre o GSI dos fatores isoladamente, ou em interação foram avaliados estatisticamente e estão apresentados no quadro de análise de variância, Tabela 13.

Tabela 13: Análise de variância para esquema fatorial inteiramente casualizado para resposta GSI médio na largura de aplicação com sobreposição.

Causas de variação sobre o parâmetro GSI	G.L.¹	S.Q.²	Q.M.³	F-Valor	P-Valor
Modelo	15	4878.93	325.26	27.4	0.000
Linear	4	4686.15	1171.54	98.71	0.000
Produto	1	4460.37	4460.37	375.81	0.000
Dose	1	7.99	7.99	0.67	0.424
Rotação	1	177.66	177.66	14.97	0.001
Pás	1	40.14	40.14	3.38	0.085
Interações de 2ª ordem	6	154.77	25.8	2.17	0.101
Produto*Dose	1	69.27	69.27	5.84	0.028
Produto*Rotação	1	47.88	47.88	4.03	0.062
Produto*Pás	1	34.07	34.07	2.87	0.110
Dose*Rotação	1	1.83	1.83	0.15	0.700
Dose*Pás	1	1.15	1.15	0.1	0.759
Rotação*Pás	1	0.57	0.57	0.05	0.830
Interações de 3ª ordem	4	29.04	7.26	0.61	0.660
Produto*Dose*Rotação	1	4.84	4.84	0.41	0.532
Produto*Dose*Pás	1	21.83	21.83	1.84	0.194

Produto*Rotação*Pás	1	2.27	2.27	0.19	0.667
Dose*Rotação*Pás	1	0.1	0.1	0.01	0.928
Interações de 4ª ordem	1	8.97	8.97	0.76	0.398
Produto*Dose*Rotação*Pás	1	8.97	8.97	0.76	0.398
Erro	16	189.9	11.87		
Total	31	5068.83			

Tabela 13 – continuação.

1. Grau de liberdade / 2. Soma de quadrados / 3. Quadrado médio

Os resultados da Tabela 13 mostraram que produto e rotação do mecanismo distribuidor isoladamente provocam influências estatisticamente válidas quando comparados esses fatores com os demais, estejam eles isolados ou com suas combinações.

O teste de Tukey para comparação de médias foi empregado para verificar diferenças dos fatores produto e rotação. Apenas o fator produto apresentou médias de GSI estatisticamente diferentes, como apresentado na Figura 40.

*Médias seguidas de letras maiúsculas diferentes dentro de um mesmo fator ou da combinação de fatores indicam diferença estatística ao nível de 1% segundo o teste de Tukey.

Produto		
Níveis	N	GSI
13-00-36	16	42,82 A*
27-00-00	16	19,20 B

Rotação do mecanismo distribuidor		
Níveis	N	GSI
810	16	33,37 A
735	16	28,65 A

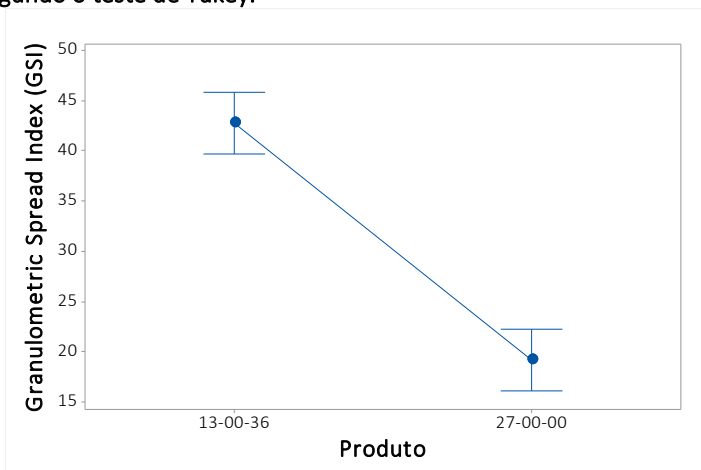


Figura 40: Resultados do teste de Tukey dos fatores relevantes para a resposta GSI médio na largura de aplicação a direita. Representação gráfica das médias da resposta para os níveis do fator produto a direita. No gráfico o ponto central indica a média e a linha vertical entre os traços horizontais representam o desvio padrão para a média.

Ao tomar os produtos em separado e analisar a ocorrência de efeitos para os fatores remanescentes e suas interações foi possível compreender melhor o fenômeno em estudo.

A análise com os dados referentes ao produto 13-00-36 não mostrou efeito para nenhum dos fatores sobre o GSI, sejam eles isolados ou com interação. Na análise dos dados referentes ao produto 27-00-00 houve efeitos que estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Análise de variância para resposta GSI médio na largura de aplicação com sobreposição nas repetições que utilizaram o produto 27-00-00.

Causas de variação sobre o parâmetro GSI, produto 27-00-00	G.L. ¹	S.Q. ²	Q.M. ³	F-Valor	P-Valor
Modelo	7	101,367	14,4810	10,56	0,002
Linear	3	82,822	27,6072	20,14	0,000
Dose	1	62,157	62,1568	45,34	0,000
Rotação	1	20,541	20,5406	14,98	0,005
Pás	1	0,124	0,1241	0,09	0,771
Interações de 2ª ordem	3	13,068	4,3559	3,18	0,085
Dose*Rotação	1	6,308	6,3081	4,60	0,064
Dose*Pás	1	6,474	6,4738	4,72	0,062
Rotação*Pás	1	0,286	0,2860	0,21	0,660
Interações de 3ª ordem	1	5,478	5,4778	4,00	0,081
Dose*Rotação*Pás	1	5,478	5,4778	4,00	0,081
Erro	8	10,967	1,3709		
Total	15	112,335			

1. Grau de liberdade / 2. Soma de quadrados / 3. Quadrado médio

Para verificar a ocorrência de diferenças nas médias de GSI em virtude dos fatores dose e rotação do mecanismo distribuidor foi aplicado o teste de Tukey a uma confiança de 99%, com os resultados relevantes da Tabela 14, indicando que apenas o fator dose apresenta médias de GSI estatisticamente diferentes, como está na Figura 41.

*Médias seguidas de letras maiúsculas diferentes dentro de um mesmo fator ou da combinação de fatores indicam diferença estatística ao nível de 1% segundo o teste de Tukey.

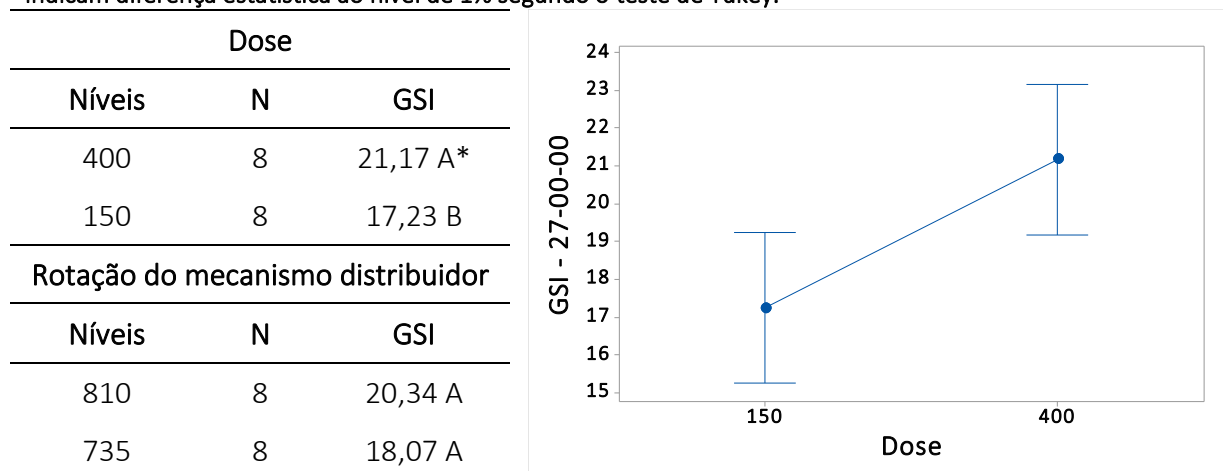


Figura 41: Resultados do teste de Tukey dos fatores relevantes para a resposta GSI médio na largura de aplicação a direita. Representação gráfica das médias da resposta para os níveis do fator dose a direita. No gráfico o ponto central indica a média e a linha vertical entre os traços horizontais representam o desvio padrão para a média.

4.4. Segregação dentro da largura útil de trabalho

Conforme foi apresentado nas Figuras 35, 36, 37 e 38, a segregação foi mais pronunciada próximo a passagem do equipamento, quando comparada à região de maior sobreposição dos perfis transversais. Buscando verificar a influência de fatores e suas interações sobre este fenômeno foi realizada uma análise considerando os pontos de medição do GSI na região central, correspondentes a região próxima à passagem do distribuidor, produzindo assim valores médios do GSI no centro da faixa, e que estão dispostos na Tabela 15 para cada repetição do experimento.

Tabela 15: GSI médio com sobreposição referente a região central da faixa de trabalho em cada repetição.

Identificação	*Faixa (m)	*GSI	Identificação	*Faixa (m)	*GSI
A/DUP/810/150	29,00	61,88	A/SIMP/810/150	25,50	66,96
A/DUP/810/400	28,00	59,16	A/SIMP/810/400	25,50	63,01
A/DUP/735/150	25,00	43,15	A/SIMP/735/150	24,50	58,95
A/DUP/735/400	27,00	47,32	A/SIMP/735/400	28,00	47,11
B/DUP/810/150	36,00	19,79	B/SIMP/810/150	31,00	20,24
B/DUP/810/400	34,00	29,03	B/SIMP/810/400	31,00	30,26
B/DUP/735/150	22,50	19,33	B/SIMP/735/150	21,00	15,57
B/DUP/735/400	25,50	20,72	B/SIMP/735/400	20,00	22,04

* Parâmetros de resposta faixa e GSI são a média de duas repetições que possuem a mesma combinação.

O quadro da análise de variância apresentado na Tabela 16 demonstra que o produto e a velocidade, de modo isolado, tiveram efeito sobre o maior GSI próximo ao centro da passada do equipamento.

Tabela 16: Análise de variância para esquema fatorial inteiramente casualizado para resposta GSI médio na porção central da faixa de aplicação com sobreposição. Intervalo de confiança de 99%.

Causas de variação sobre o parâmetro GSI no centro	G.L. ¹	S.Q. ²	Q.M. ³	F-Valor	P-Valor
Modelo	15	10585.1	705.68	15.31	0.000
Linear	4	9965.5	2491.38	54.04	0.000
Produto	1	9150.2	9150.17	198.48	0.000
Dose	1	20.4	20.42	0.44	0.515
Rotação	1	724.4	724.38	15.71	0.001
Pás	1	70.6	70.56	1.53	0.234
Interações de 2ª ordem	6	465.5	77.58	1.68	0.189
Produto*Dose	1	214.7	214.72	4.66	0.046
Produto*Rotação	1	134.7	134.73	2.92	0.107
Produto*Pás	1	79.9	79.90	1.73	0.207

Dose*Rotação	1	19.2	19.19	0.42	0.528
Dose*Pás	1	16.1	16.14	0.35	0.562
Rotação*Pás	1	0.8	0.82	0.02	0.896
Interações de 3ª ordem	4	108.5	27.13	0.59	0.676
Produto*Dose*Rotação	1	13.6	13.58	0.29	0.595
Produto*Dose*Pás	1	66.7	66.66	1.45	0.247
Produto*Rotação*Pás	1	14.6	14.57	0.32	0.582
Dose*Rotação*Pás	1	13.7	13.72	0.30	0.593
Interações de 4ª ordem	1	45.6	45.60	0.99	0.335
Produto*Dose*Rotação*Pás	1	45.6	45.60	0.99	0.335
Erro	16	737.6	46.10		
Total	31	11322.8			

Tabela 16 - continuação

1. Grau de liberdade / 2. Soma de quadrados / 3. Quadrado médio

Para verificar diferenças médias causadas pelos dos fatores produto e rotação do mecanismo distribuidor para a resposta GSI no centro na faixa de aplicação, foi aplicado teste complementar de Tukey, ocorrido diferença estatística do fator produto, Figura 42.

*Médias seguidas de letras maiúsculas diferentes dentro de um mesmo fator ou da combinação de fatores indicam diferença estatística ao nível de 1% segundo o teste de Tukey.

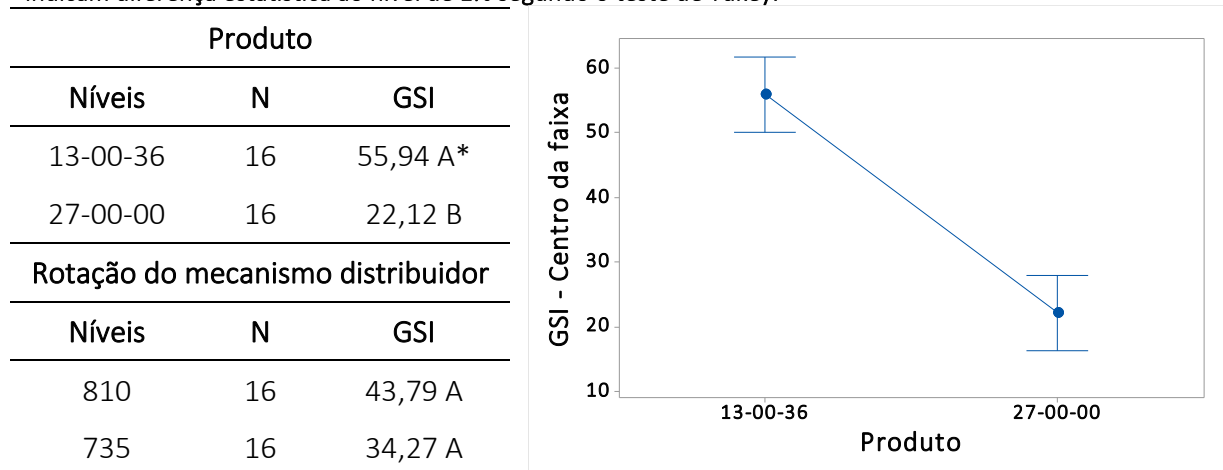


Figura 42: Resultados do teste de Tukey dos fatores relevantes para a resposta GSI médio na região central da largura de aplicação a direita. Representação gráfica das médias da resposta para os níveis do fator produto a direita. No gráfico o ponto central indica a média e a linha vertical entre os traços horizontais representam o desvio padrão para a média.

Buscando encontrar alguma influência complementar de algum fator do experimento para a resposta GSI médio na região central da faixa de aplicação, foi proposto analisar o conjunto de dados completo de forma separada, considerando o fator produto como bloco, gerando-se duas análises fatoriais distintas, sendo uma para o produto 13-00-36 de maior GSI

e outra para o produto 27-00-00 de menor GSI, ambas tendo como fatores dose, tipo de pá e rotação do mecanismo distribuidor.

A análise com os dados referentes ao produto 13-00-36 não mostrou nenhuma influência estatisticamente válida para nenhum dos fatores, sejam eles isolados ou com interação. Já a análise dos dados referentes às repetições com a utilização do produto 27-00-00 estão apresentados a seguir.

Tabela 17: Análise de variância para esquema fatorial inteiramente casualizado para resposta GSI médio na região central da faixa de aplicação com sobreposição nas repetições que utilizaram o produto 27-00-00. Intervalo de confiança de 99%.

Causas de variação sobre o parâmetro GSI no centro, produto 27-00-00	G.L.¹	S.Q.²	Q.M.³	F-Valor	P-Valor
Modelo	7	351,107	50,158	12,52	0,001
Linear	3	301,081	100,360	25,06	0,000
Dose	1	183,784	183,784	45,88	0,000
Rotação	1	117,152	117,152	29,25	0,001
Pás	1	0,145	0,145	0,04	0,854
Interações de 2ª ordem	3	45,380	15,127	3,78	0,059
Dose*Rotação	1	32,533	32,533	8,12	0,021
Dose*Pás	1	8,599	8,599	2,15	0,181
Rotação*Pás	1	4,247	4,247	1,06	0,333
Interações de 3ª ordem	1	4,646	4,646	1,16	0,313
Dose*Rotação*Pás	1	4,646	4,646	1,16	0,313
Erro	8	32,043	4,005		
Total	15	383,150			

1. Grau de liberdade / 2. Soma de quadrados / 3. Quadrado médio

O quadro da análise da variância apresentado na Tabela 17 mostra que a dose e a rotação do mecanismo distribuidor isoladamente provocam influências estatisticamente válidas.

Para que fosse possível comprovar as diferenças estatísticas dos fatores dose e rotação do mecanismo distribuidor para a resposta GSI médio na região central da faixa de aplicação das repetições que utilizaram o produto 27-00-00, foi aplicado teste complementar de Tukey com o mesmo intervalo de confiança de 99% no conjunto de dados de interesse na Tabela 17, tendo apenas o fator dose apresentado médias de GSI estatisticamente diferentes, como está na Figura 43.

Dose		
Níveis	N	Média
400	8	25,51 A*
150	8	18,73 B

Rotação do mecanismo distribuidor		
Níveis	N	Média
810	8	24,83 A
735	8	19,41 A

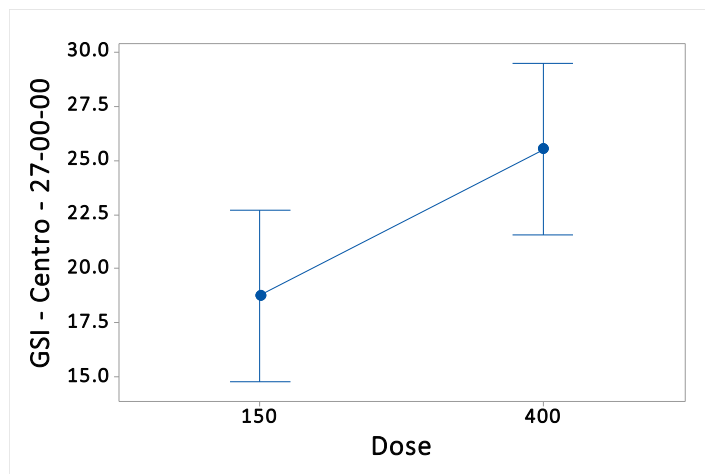


Figura 43: Resultados do teste de Tukey dos fatores relevantes para a resposta GSI médio na região central da largura de aplicação a direita. Representação gráfica das médias da resposta para os níveis do fator dose a direita. No gráfico o ponto central indica a média e a linha vertical entre os traços horizontais representam o desvio padrão para a média. *Médias seguidas de letras maiúsculas diferentes dentro de um mesmo fator ou da combinação de fatores indicam diferença estatística ao nível de 1% segundo o teste de Tukey.

GSI como parâmetro mensurável para a intensidade da segregação granulométrica se mostrou adequado, conforme se verificou há uma relação entre este parâmetro, a faixa e qualidade de aplicação. Foi possível medir a segregação granulométrica ao longo de toda a largura de distribuição e verificar a existência de fatores que influenciam no aumento ou diminuição do fenômeno. Virk et al (2013) também apresentam o argumento de maneira semelhante ao realizar análise de segregação em distribuição com equipamento de mecanismo centrífugo, inclusive utilizando um método alternativo por imagem para a medição do GSI, o que torna mais simples a obtenção da medida, e sugerindo a prática da medição do índice em uma amostra de produto no momento de fazer a calibração do equipamento.

Os resultados demonstraram ser possível inferir sobre a maior ou menor intensidade de segregação granulométrica através da interpretação do valor do GSI medido em uma amostra de fertilizante, comparando com os valores de referência da Tabela 4:Índice GSI e sua interpretação. Fonte: Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos 2014. (MAPA, 2014).

5. CONCLUSÕES

A caracterização das propriedades físicas densidade, dureza das partículas e granulometria permite determinar a aptidão que tal produto possui para ser aplicado a lanço através de mecanismo de distribuição centrífugo. Para os produtos utilizados houve diferença na composição granulométrica e na dureza das partículas.

As larguras de aplicação foram afetadas pela rotação do disco lançador do mecanismo centrífugo, pelo tipo de pá utilizada sobre os discos e pela interação entre produto e rotação. O produto com maior uniformidade em sua composição granulométrica permite aumento na largura por meio do incremento na rotação.

O *Granulometric Spread Index* (GSI) pode ser empregado como parâmetro qualitativo adicional na avaliação típica de distribuição transversal, sendo possível caracterizar através dele a intensidade da segregação granulométrica ao longo da faixa de aplicação. A segregação para produtos com distintos valores de GSI é mais intensa próximo à região em que o aplicador passa sendo menor na porção entre passadas laterais.

É possível alterar as configurações do mecanismo distribuidor para obter simultaneamente uma distribuição que atinja a maior faixa de aplicação com coeficiente de variação aceitável e tenha minimização da segregação granulométrica.

Quando a qualidade da distribuição é avaliada em termos da segregação granulométrica, a rotação do mecanismo distribuidor altera a intensidade da segregação, mas a escolha do produto é o fator determinante sobre a segregação. O produto originalmente mais heterogêneo em termos de granulometria apresentou qualidade inferior na deposição sendo a segregação maior que aquela observada para o produto com menor GSI.

A escolha dos produtos para aplicação a lanço com distribuidor centrífugo de dois discos, bem como a regulação adequada dos parâmetros do mecanismo distribuidor são determinantes na segregação granulométrica vista no campo, podendo se ter um resultado melhor de qualidade quando se opta por um produto que apresente baixo GSI, para uma taxa de alimentação do mecanismo também mais baixa e com a rotação do mecanismo distribuidor adequada.

REFERÊNCIAS

ANDA. Agência Nacional para Difusão de Adubos. **Principais indicadores do setor de fertilizantes**. São Paulo, SP. 2022

ALCARDE J. C. **Fertilidade do solo 1ªed**. Sociedade Brasileira de Ciência do solo. Cap. 12 P.744-752. Viçosa, MG. 2007.

ASAE. **ASAE S341.4. Procedure for measuring distribution uniformity and calibrating granular broadcast spreaders**. St Joseph: ASABE Standards, 2009.

ASAE. **ASAE S341.5. Procedure for measuring distribution uniformity and calibrating granular broadcast spreaders**. St Joseph: ASAE Standards, 2018.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Gabinete do Ministro. Instrução Normativa nº39, de 08 de agosto de 2018. **Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, registro de produto, autorizações, embalagem, rotulagem, documentos fiscais, propaganda e tolerâncias dos fertilizantes minerais destinados à agricultura**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 10 ago 2018. p.19.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos**. Brasília, DF. 2014.

COLLEY T.; FULTON J.; MANN D.; PORT K. **Spinner-Disc Spreader Set Up and Calibration**. The Ohio State University. FABE-561.1. 2018.

CROZIER, C.; ROBERSON, G. T. **Granular fertilizer spreader swath uniformity achieved at varying target application rates**. Crop Management, Madison, v. 13, n. 1, p. 1-10, 2014

FULTON J. P. & PORT K. **Physical properties of granular fertilizers and impact on spreading**. The Ohio State University. FABE-550.1. 2016.

FULTON J. P. et al. **Case study: Distribution uniformity of a blended fertilizer applied using a variable-rate spinner-disc spreader**. Eng. in Agriculture. ASABE Vol. 29. No 5. ISSN 0883-8542. 2013

GARVEY S. **New Leader demos a broadcast spreader**. Grainews Machinery &Shop. Canadá. 2015. Disponível em: <<https://www.grainews.ca/machinery-shop/new-leader-demos-a-broadcast-spreader/>>. Acessado em 02 de março de 2021.

GOOGLE MAPS. **“Coordenadas cartesianas latitude e longitude de localidade em Pompeia” SP**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-22.109317,-50.2510501,17.75z?hl=pt-PT>>. Acessado em 25 de junho de 2019.

GRAFTON M. C. E.; YULE I. J.; ROBERTSON B. G. **The Ballistics of Separation of Fertilizer Blends at Wide Bout Widths**. Center for Precision Agriculture, Massey University, New Zealand. 2014.

GRIFT T. E. & HOFSTEE J. W. **Testing an online spread pattern determination sensor on a broadcast fertilizer spreader.** Transactions of the ASAE. Vol. 45(3): 561 – 567. ISSN 0001–2351. 2002

HANSEN J.S. **Test and validation of machinery and technologies - Fertilizer chart and distribution.** Danish Technological Institute (DTI), Germany. Disponível em: <<https://www.dti.dk/specialists/test-and-validation-of-machinery-and-technologies/fertilizer-chart-and-distribution/38060,5>>. Acessado em 01 de março de 2021.

HEEGE H J. **Quality of raw materials for fertilizer-blends: defining a standard.** AFCOME Bulk Blending - 1ªEd. Department of agricultural Systems Engineering, Strasbourg, Germany, 2003.

HOFSTEE J. W.; GRIFT T.E.; J. T. WALKER. **Aerodynamic properties of individual fertilizer particles.** Power and Machinery Div. ASAE Vol. 40(1): 13-20. 1997

HOFSTEE J. W. & W. HUISMAN. **Handling and spreading of fertilizers Part 1: Physical properties of fertilizers in relation to particle motion.** J. Agric. Eng. Res., 47, 213-234. 1990.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Painel de indicadores - Produto Interno Bruto (PIB) 2020.** Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/indicadores#variacao-do-pib>>. Acessado em: 11 de março de 2021.

IEA – INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Análise de indicadores do agronegócio.** ISSN 1980 0711. V. 13. N. 4. São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/ftp/iea/AIA/AIA-16-2018.pdf>>. Acessado em: 14 de março de 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3944. Fertilizers – Determination of bulk density (loose).** Geneve, 1992.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 5311. Fertilizers – Determination of bulk density (tapped).** Geneve, 1992.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 5690. Equipment for distributing fertilizers – Test methods – Part 1: full width fertilizers distributors.** Geneve: ISO Standard hand book 13, Agricultural machinery, p. 373-385, 1982.

JACTO S/A. **SmatSet – Serviço de assistência para ajuste dos distribuidores de fertilizantes Jacto.** Disponível em: <<https://www.jactosmartset.com.br/jacto/>>. Acessado em 09 de julho de 2019.

LAWRENCE H. G. et al. **A statistical analysis of international test methods used for analysing spreader performance.** New Zealand Journal of Agricultural Research. Vol. 49: 451-463. 2006.

MATOS M. A.; SALVI, J.V.; MILAN M. **Pontualidade na operação de semeadura e a antecipação da adubação e suas influências na receita líquida da cultura da soja.** Engenharia Agrícola, 26(2): 493-501, 2006.

MIALHE L. G. **Características das máquinas distribuidoras de calcário de fabricação nacional.** In: Simpósio sobre aplicação de calcário na agricultura. Campinas. FUNDAÇÃO CARGILL. 1986

MICHELI B. G. et al. **Potencial econômico da tecnologia de controle automático de seções para adubação a lanço.** Infomações Agronômicas NPCT N°11. ISSN 2311-5904. Piracicaba 2021. 12p.

MILAN M. & GADANHA JR, C. D. **Máquinas para aplicação de adubos e corretivos.** In: Mialhe LG (Ed.) **Máquinas Agrícolas: ensaio e certificação.** Piracicaba: FEALQ 1996. 722p.

MINITAB, LLC (2018). **Minitab® 18 Support. Seção - “Ajuda e como fazer”.** 2022. Disponível em: <<https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/>>. Acessado em 24 de fevereiro de 2022.

MOLIN J. P. et al. **Adulção 3.1: Montagem do teste de campo, Manual de uso passo-a-passo, Análise de resultados.** Piracicaba: USP/ESALQ. Projeto AP. 2015. 20p.

MOLIN J.P. et al. **Segregação de fertilizantes aplicados a lanço.** Eng. Agríc. ISSN 0100-6916. vol.29 no.4. Jaboticabal 2009.

NUNES, J. L. S. & GIRACCA, E. M. N. **Manejo de fertilizantes e correivos agrícolas.** 2016. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/fertilizantes/manejo_361439.html>. Acessado em 25 de junho de 2019.

ORTIZ-CAÑAVATE, J. **Las Máquinas Agrícolas y su Aplicación.** 6.ed. Madrid: Mundi-Prensa, 528p. 2003.

PARISH, R. L. **Granular Spreaders: Selection, Calibration, Testing and Use.** Technical Bulletin. LSU College of Agriculture. 1999.

PIRON E. et al. **Centrifugal spreader eco-evaluation method: Sulky Econov example.** 1° AXEMA EurAgEng Conference. França. 2017.

SAS Institute Inc. 2018. **SAS® Studio.** Copyright 2012-2017, Cary, NC, USA.

SOGAARD H.T. e KIERKEGAARD. **Yield reduction from uneven fertilizer distribution.** Trans. ASAE. 37(6): 1749-1752. 1994.

SOLUTION FOR AGRICULTURE. **Densidades de fertilizantes comerciais.** 2020. Disponível em: <www.fluidfertilizer.com/pdf/Fluid%20Characteristics.pdf>. Acessado em 15/10/2020.

SULKY. **Original Instructions X50+ (en).** Manual de utilização. Chateaubourg, França. 2015.

TANG V. M. P. e PATTERSON P. H. **Size segregation studies using a primary segregation shear cell.** ASAE Meeting Preservation. Chicago, Illinois, USA, 2002.

THAPER R. K. **Effect of vane shape and product on spread uniformity using a dual-disc spinner spreader**. Auburn University. Alabama, USA, 2014.

THE MOSAIC COMPANY. **Densidade de fertilizantes comerciais**. 2020. Disponível em: <<https://www.cropnutrition.com/product-specs-and-safety-info>>. Acessado em: 15/10/2020.

UESC. **Fertilidade do solo – Adubos ou fertilizantes**. 2013. Disponível em: <<http://fertilidadedodosolouesc.blogspot.com/2013/10/adubos-ou-fertilizantes.html>>. Acessado em 05/03/2021.

VERA P. M. et al. **Flow of salt particles on a spinning spreader disk**. Technical Report. NORDFOU Association. Denmark. 2014.

VIRK S. S. et al. **Distribution uniformity of a blended fertilizer applied using a variable-rate spinner-disc spreader**. Appl. Eng. Agri. 29(5): 883-8542. 2013.

WESTERN R. **Delilah Spinning Disc Manure Spreader**. Richard Western Machinery Manufacture. United Kingdom. 2020. Disponível em: <<https://www.richardwestern.com/product-range/manure-spreaders/delilah-spinning-disc-manure-spreader/>>. Acessado em: 21 de agosto de 2020.

YARA BRASIL. **Indústria de fertilizantes S/A**. Informativo técnico de dureza dos fertilizantes. Disponível em: <<https://www.yarabrasil.com.br/nutricao-de-plantas/manuseio-de-fertilizantes/propriedades-fisicas-dos-fertilizantes/>>. Acessado em 13 de junho de 2020.

YILDIRIM Y. e KARA M. **Effect of vane height on distribution uniformity in rotary fertilizer spreaders with different flow rates**. Appl. Eng. Agri. 19(1): 19-23. 2003

YILDIRIM Y. **Effect of vane number on distribution uniformity in single-disc rotary fertilizer spreaders**. Appl. Eng. Agri. 22(5): 659-663. 2006.

YILDIRIM Y. **Effect of vane shape on fertilizer distribution uniformity in single-disc rotary fertilizer spreaders**. Appl. Eng. in Agri. 24(2): 159-163. 2008.

YILDIRIM Y. e KARA M. **Effect of different vane combinations on fertilizer distribution uniformity with various flow rates in spinning disc broadcasters**. J. Agri. Sciences (18): 54-62. 2012.

YINYAN S. et al. **Numerical simulation of spreading performance and distribution pattern of centrifugal variable-rate fertilizer applicator based on DEM software**. Computers and Electronics in Agriculture. Vol144 (249-259). ISSN: 0168-1699. 2018

YULE I. J. e GRAFTON M. C. E. **New spreading technologies for improved accuracy and environmental compliance**. Center for Precision Agriculture, Massey University, New Zealand. 2013.

YULE I., PEMBERTON J. 2009. **Spreader testing for mixing and segregation of blended fertilisers.** ASABE No. 096380. ASABE Annual International Meeting. Reno, NV