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

Redimensionamento de distribuidor pendular para grandes vazões de calcário

Cássio da Costa Duarte

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

Piracicaba
2019

Cássio da Costa Duarte
Engenheiro Mecânico

Redimensionamento de distribuidor pendular para grandes vazões de calcário
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ PAULO MOLIN**

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

Piracicaba
2019

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

Duarte, Cássio da Costa

Redimensionamento de distribuidor pendular para grandes vazões de calcário / Cássio da Costa Duarte. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011 - - Piracicaba, 2019.

61 p.

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

1. Distribuição a lanço 2. Perfil da distribuição 3. Largura efetiva I. Título

AGRADECIMENTOS

Ao professor **Dr. José Paulo Molin** pela oportunidade, orientação e paciência. Resumi-lo apenas como orientador é muito pouco. Não saberia dizer em palavras o quanto sou grato.

Aos amigos da pós-graduação: **Luis Gustavo Mendes (Guia), Pedro Henrique (Pedrão), Marcelo Chan, Lucas Corredo, Tatiana Canata, Leonardo Maldaner (Tchê), Bruna Passalacqua, Tiago Tavares e Mauricio Martello**, pela amizade e suporte durante todo o mestrado.

Aos amigos membros do gMAP, pelo auxílio e colaração em todos os momentos.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas, em especial ao **Chicão**, pela ajuda durante a montagem do protótipo.

À **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES** pela bolsa de estudos concedida para a realização do mestrado.

À **Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP)**, pela oportunidade de realizar o curso de mestrado, contribuindo para minha formação acadêmica e profissional.

E a todos que, de alguma forma, contribuíram para a execução desse trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	9
1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1. Acidez do solo e necessidade da calagem.....	13
2.1.1 Características do calcário agrícola.....	15
2.2. Máquinas distribuidoras	16
2.3. Distribuidora pendular	19
2.4. Ensaio para determinação da largura efetiva de aplicação	25
3. MATERIAL E MÉTODOS	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5. CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS	55
APÊNDICES	61

RESUMO

Redimensionamento de distribuidor pendular para grandes vazões de calcário

Aproximadamente 70% dos solos com potencial agrícola no Brasil são classificados como solos ácidos, e para sua correção realiza-se, normalmente, a aplicação do calcário em pó. Apesar de ser o insumo sólido mais consumido no país, nota-se uma baixa qualidade em suas aplicações além da inexistência de equipamentos dedicados à sua aplicação e de esforços em pesquisa e desenvolvimento de novos conceitos de máquinas nesse sentido. Atualmente a maior parte das aplicações a lanço de granulados (fertilizantes) e pós (corretivos) são realizadas através de distribuidores centrífugos. Provavelmente essa tenha sido a razão para os fabricantes optarem por investir mais nessas máquinas, estagnando assim a evolução dos distribuidores de princípio pendular, os quais realizam as aplicações através do movimento oscilatório horizontal de um tubo. Diante desse cenário, buscou-se adaptar e redimensionar um distribuidor de princípio pendular dedicados à fertilizantes para aplicação de grandes vazões de calcário em pó. Fabricou-se um protótipo com mecanismo dosador volumétrico e acionamento do pêndulo via motor elétrico conectado a um inversor de frequência. Utilizou-se pêndulos de policloreto de vinila (PVC) com diferentes comprimentos com e sem rampa em suas extremidades. Os ensaios foram realizados em sete diferentes frequências, e mensurou-se a largura máxima de lançamento das partículas. Notou-se que tanto o incremento da frequência e do comprimento do pêndulo, assim como a utilização de uma rampa na extremidade foram, na maioria dos casos, capazes de produzir um aumento na distância de lançamento da partícula. Este estudo demonstrou a capacidade do protótipo em realizar aplicações de calcário em pó em faixa com uma vazão superior (até $6,5 \text{ kg s}^{-1}$) às convencionais ($1,5 \text{ kg s}^{-1}$) com coeficientes de variação inferiores a 3,14 %. Além disso, mostrou-se que é possível variar a largura da faixa de aplicação de 1,89 m até 5,69 m com a mudança do comprimento do pêndulo, frequência e utilização da rampa.

Palavras-chave: Distribuição a lanço; Perfil da distribuição; Largura efetiva

ABSTRACT

Pendulum spreader resizing for large limestone flow rate

Approximately 70% of the soils with agricultural potential in Brazil are classified as acid, and, for their neutralization the application of lime powder is usually carried out. Despite of being the most used solid agricultural input in the country, it can be noticed a low quality in its application, besides the lack of equipment dedicated exclusively to its application and of efforts in research and development of new concepts of machines in that sense. Currently, most of the granulated and powder application carried out through centrifugal spreaders. Probably this was the reason why manufactures opted to invest more in these kind of spreader, stagnating the evolution of pendulum spreaders, which realize the distribution through the horizontal oscillatory movement of a tube (spout). In this context, it was intended to adapt and resize a pendular spreader dedicated to fertilizers for application of large flows of lime powder. A prototype with volumetric measure mechanism and eletric motor drive, connected to a frequency inverter, was developed. Polyvinyl chloride (PVC) pendulums with different lengths were used, with and without a ramp at their ends.. The tests were perfomed at seven different frequencies, and the higher widht distance was measured. It was noted that the increase in frequency and length of the tube, as well as the addition of a ramp at the border were, in most cases, able to increase the flight distance of the particles. This study demonstrated the ability of the prototype to spread limestone with a higher flow rate (up to 6.5 kg s^{-1}) than the conventional ones (1.5 kg s^{-1}) with coefficient of variation lower than 3.14%. Furthermore, it has been shown that is possible to vary the width of the application range form 1.89 m to 5.69 m by modifying the length of the tube, frequency and use of the ramp.

Keywords: Spreader; Pattern distribution; Swath width

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Faixa de pH encontradas para a maioria dos solos.	13
Figura 2 - Influência do pH do solo na disponibilidade de nutrientes.	14
Figura 3 - Tipos de distribuição em faixa (1); em linha (2); a lança (3).	17
Figura 4 - Exemplos de mecanismos dosadores: volumétrico, por esteira (1) e comporta (2), (A); gravitacional, por abertura de orifícios (3) (B); volumétrico, através de parafuso helicoidal (C).	18
Figura 5 - Croqui de um distribuidor no qual a deposição é feita por queda livre.	18
Figura 6 - Distribuidores a lança: centrífugo monorotor (A), pendular (B).	19
Figura 7 - Distribuidor gravitacional (queda livre) realizando a calagem (Stara, Super Bruttus).	19
Figura 8 - Distribuidor pendular e seus principais componentes: reservatório (1), mecanismo dosador (2), agitador (3), alavanca reguladora do mecanismo dosador (4), pêndulo(5).	20
Figura 9 - Croqui do princípio de funcionamento do mecanismo pendular.	21
Figura 10 - Influência do defletor na deposição do material.	21
Figura 11 - Pêndulo equipado com defletor (A) em sua extremidade, com destaque para a "ponte" (B).	21
Figura 12 - Peças responsáveis por transformar a rotação proveniente da TDP em movimento oscilatório horizontal. Fonte: Adaptado de “Adubadora – semeadora pendular” Manual de instruções e catálogo de peças, Vicon, 2016.	22
Figura 13 - Relação entre posição do volante e velocidade angular do pêndulo.	22
Figura 14 - Croquis dos tipos de circuitos mais utilizados na aplicação de fertilizantes e corretivos: circuito alternado (A); circuito contínuo, com giros nas cabeceiras do talhão (B).	23
Figura 15 - Volante com diferentes posições para fixação do mancal.	24
Figura 16 – Relação entre o raio do centro o mancal ao centro do volante e a distância entre a fixação do garfo e o centro do volante.	24
Figura 17 - Relação entre a rotação da TDP e a largura de trabalho em uma distribuidora pendular.	24
Figura 18 - Modelo esquemático da disposição dos coletores nos ensaios de largura de aplicação, na configuração de uma lacuna, da mesma dimensão do coletor, entre os coletores.	25
Figura 19 - Exemplo de gráfico CV% <i>versus</i> Largura, gerado pelo programa Adulção 3.1 (2015), utilizado para determinação da largura efetiva.	27
Figura 20 - Distribuidora DCA 5500 sem o mecanismo distribuidor. Modelo forneceu o reservatório e mecanismo dosador, que se enquadravam às propostas do projeto.	31
Figura 21 – Distribuidora pendular PS600 (A) que serviu como base para ao projeto, da qual foram obtidas as peças responsáveis pelo acionamento do pêndulo (B).	32
Figura 22 - Funil projetado para direcionar o material proveniente do mecanismo dosador para o pêndulo.	32
Figura 23 - Dimensões do funil e bocal de saída, em milímetros, onde ocorre a fixação dos pêndulos de diferentes comprimentos.	33
Figura 24 - Funil com pêndulo, montado de maneira a deixar o pêndulo paralelo ao solo.	33
Figura 25 - Estrutura para sustentação do mecanismo distribuidor.	34
Figura 26 - Acionamento do conjunto: motor elétrico e transmissão de rodas denteadas e corrente.	34
Figura 27 - Inversor de frequência utilizado para controle de rotação do motor elétrico.	34
Figura 28 - Amplitude de movimento do pêndulo, mensurado para o protótipo desenvolvido.	35
Figura 29 - Testes iniciais do conjunto para avaliar a capacidade do protótipo em lançar o calcário.	36
Figura 30 - Rampa (30°) fixada à extremidade do pêndulo.	36
Figura 31 - Representação da metodologia utilizada para mensurar a largura máxima de lançamento das partículas.	37
Figura 32 – Exemplos dos ensaios para determinação do perfil da faixa de aplicação.	37
Figura 33 - Formatos e dimensões, em milímetros, dos pêndulos ensaiados para avaliação do perfil de distribuição.	38
Figura 34 - Comparação entre o perfil de distribuição produzido por uma distribuição estática (a) e cinemática (b).	38
Figura 35 - Comparação entre as distâncias obtidas para pêndulos de 100 mm de comprimento. Letras minúsculas comparam pêndulos de diferentes configurações em uma mesma frequência; letras maiúsculas comparam pêndulos sem rampa em diferentes frequências; negrito comparam pêndulos com rampa em diferentes frequências.	41

Figura 36 - Comparação entre as distâncias obtidas para pêndulos de 200 mm de comprimento. Letras minúsculas comparam pêndulos de diferentes configurações em uma mesma frequência; letras maiúsculas comparam pêndulos sem rampa em diferentes frequências; letras em itálico e negrito comparam pêndulos com rampa em diferentes frequências.	44
Figura 37 - Comparação entre as distâncias obtidas para pêndulos de 300 mm de comprimento. Letras minúsculas comparam pêndulos de diferentes configurações em uma mesma frequência; letras maiúsculas comparam pêndulos sem rampa em diferentes frequências; letras em itálico e negrito comparam pêndulos com rampa em diferentes frequências.	44
Figura 38 - Comparação entre as diferentes configurações de pêndulos para uma determinada frequência. Letras iguais não diferem estatisticamente a nível de 5% de significância.	45
Figura 39 - Perfil de distribuição produzido pelo pêndulo circular de 150 mm de diâmetro.	46
Figura 40 – Valores de CV para diferentes larguras efetivas simuladas para o pêndulo circular de 150 mm de diâmetro.....	47
Figura 41 - Perfil de distribuição produzido por um tubo circular de 150 mm com adição de um tubo de 50 mm na sua parte inferior.	47
Figura 42 - Valores de CV para diferentes larguras efetivas simuladas para o pêndulo circular de 150 mm de diâmetro e tubo de 50 mm na parte inferior.....	48
Figura 43 - Perfil de distribuição produzido por um tubo circular de 150 mm com adição de um tubo de 50 mm em seu interior.....	49
Figura 44 - Valores de CV para diferentes larguras efetivas simuladas para o pêndulo circular de 150 mm de diâmetro e tubo de 50 mm no interior.	49
Figura 45 - Perfis de deposição produzidos pelo bocal de saída elíptico com maior dimensão na vertical (A), e maior dimensão na horizontal (B).	50
Figura 46 - Valores de CV para diferentes larguras efetivas simuladas para o pêndulo elíptico de maior dimensão na vertical (A), e maior dimensão na horizontal (B).	50
Figura 47 - Perfil de distribuição produzido por uma distribuidora pendular Vicon PS200, com defletor na extremidade do pêndulo.....	51
Figura 48 - Valores de CV para diferentes larguras efetivas simuladas para a distribuidora pendular Vicon PS600.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidade de neutralização de diferentes neutralizantes em relação ao carbonato de cálcio.....	15
Tabela 2 - Taxas de reatividade para partículas de diferentes tamanhos.	16
Tabela 3 - Características do calcário utilizado nos ensaios.	35
Tabela 4 - Relação entre frequência no inversor e frequência de funcionamento.....	39
Tabela 5 - Valores obtidos para pêndulos com 100 mm de comprimento, com e sem rampa na extremidade.	40
Tabela 6 - Valores obtidos para pêndulos com 200 mm de comprimento, com e sem rampa na extremidade.	42
Tabela 7 - Valores obtidos para pêndulos com 300 mm de comprimento, com e sem rampa na extremidade.	43

1. INTRODUÇÃO

A agricultura tem um papel fundamental no desenvolvimento econômico e social do Brasil devido a sua expressiva participação na economia e na geração de empregos. A mecanização agrícola representa um fator de grande importância para a competitividade em termos de custo na agricultura brasileira, sendo o segundo fator de produção mais importante, inferior apenas à posse da terra (PELOIA & MILAN, 2010). Destaca-se também sua relevância no cenário agrícola tanto brasileiro quanto mundial, que permitiu a expansão das áreas cultiváveis e o crescimento da produtividade por unidade de área, além de melhorar as condições de trabalho do operador.

Grande parte da expansão territorial brasileira tem ocorrido em regiões do cerrado, com solos de elevada acidez e baixos índices de cálcio e magnésio (MAGNI, 2013), além de possuir toxidez causada por alumínio (FERREIRA et al., 2006), fatores bastante prejudiciais à produtividade. Segundo Quaggio (2000), aproximadamente 70% dos solos agrícolas do Brasil é composto por solos ácidos, e para correção da acidez do solo é normalmente realizada a aplicação de calcário, também conhecida como calagem (RAMOS, 2006). Dentre seus principais efeitos no solo, estão a elevação do pH, fornecimento de cálcio e magnésio e a neutralização do alumínio tóxico (RHEINHEIMER et al., 2000; AMARAL & ANGHINONI, 2001; RAIJ, 2011). Porém, apesar de ser o insumo sólido mais consumido no Brasil, com cerca de 30 milhões de toneladas em 2017, segundo a Associação Brasileira dos Produtores de Calcário Agrícola (ABRACAL, 2017), nota-se baixa qualidade nas aplicações de calcário e gesso. Ao mesmo tempo, observa-se a inexistência de equipamentos dedicados à aplicação de calcário em pó e de esforços em pesquisa e desenvolvimento de novos conceitos de máquinas nesse sentido.

Em relação às máquinas distribuidoras, os modelos que utilizam distribuidor centrífugo são os mais utilizados no país devido ao fato de estarem normalmente associados à grande capacidade de carga e consequente autonomia, além de consideráveis larguras de trabalho (LUZ, 2002). Uma característica do mercado nacional é a utilização destes distribuidores para a aplicação tanto de produtos granulados (fertilizantes) quanto pós (corretivos). Provavelmente essa tenha sido a razão para os fabricantes optarem por investir mais nessas máquinas, estagnando assim a evolução dos distribuidores de princípio pendular, os quais realizam as aplicações através do movimento oscilatório horizontal de um tubo. Estes, hoje, são associados a máquinas com reservatório de pequena capacidade, mecanismo dosador gravitacional destinado a produtos granulados e em baixas vazões, montadas no engate de três pontos do trator.

Apesar disso os distribuidores pendulares apresentam algumas características relevantes que os diferenciam. Apresentam melhor uniformidade na aplicação em relação aos centrífugos (PARISH, 1995a) e teoricamente sem desigualdades entre os lados de deposição devido ao seu movimento simétrico, fato que não ocorre obrigatoriamente nas máquinas com distribuidor centrífugo (PARISH & BERGERON, 1991; COELHO et al., 1992b; PARISH 1995a). Outra particularidade é a possibilidade de poder aplicar o produto em duas faixas separadas, junto aos pés das árvores, com o ajuste de comprimento do pêndulo (PARISH & BERGERON, 1991). E, de acordo com Mhrar (1997), conforme citado por Mursec e Ploj (2000), causam menos impacto ao material durante a aplicação devido à maneira como as partículas são lançadas.

O calcário agrícola, por se tratar de um material em pó, é constituído de partículas de pequena massa e dimensões. Tomando como referência a equação da energia cinética, que é diretamente proporcional à massa e sua velocidade ao quadrado, observa-se a limitação de partículas desse material em serem lançadas a longas distâncias. Portanto, não espera-se que haja um incremento na distância de lançamento das partículas desse material.

A hipótese estabelecida para este trabalho é de que com o redimensionamento de um distribuidor do tipo pendular é possível a aplicação de calcário com a devida regularidade transversal a uma taxa superior às atuais, algo hoje inexistente no mercado, e devido à sua característica de apresentar uma distribuição simétrica, seria possível também realizar sobreposições em série, seguindo o mesmo princípio das pontas de pulverização, por exemplo. Sendo assim, o objetivo foi retomar o conceito de mecanismo distribuidor pendular dedicado a fertilizantes e redimensioná-lo para a utilização na aplicação de grandes vazões de calcário, com doses de até 8 ton ha⁻¹.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Acidez do solo e necessidade da calagem

A acidez do solo representa a concentração de íons H^+ em sua solução. Seu valor é representado através de uma escala logarítmica do potencial hidrogeniônico, pH, com valores que variam de 0 a 14, sendo 7 o valor neutro. Numericamente é o logaritmo do inverso da concentração do íon hidrogênio (BRADY, 1989). Quanto menor seu valor, maior a atividade de íons H^+ e maior seu caráter ácido.

Os solos podem apresentar uma reação ácida, neutra ou alcalina (MELLO et al. 1983). Essa característica tem origem nas rochas que formam os solos, porém a lixiviação, a exportação de nutrientes pelas culturas e a aplicação de determinados produtos utilizados na fertilidade do solo têm grande potencial para alterar o valor do pH.

A **Figura 1** apresenta as faixas de pH comumente encontradas nos solos e os termos utilizados para descrevê-las. Segundo Brady (1989) a maior parte dos solos possuem pH entre 4 e 10.

Figura 1 - Faixa de pH encontradas para a maioria dos solos.
Fonte: BRADY, 1989.

Notoriamente o pH do solo tem grande impacto nas lavouras. Dentre os fatores ambientais do solo, os ligados a acidez são os que mais interferem na produtividade, especialmente nas regiões tropicais (SANCHES & SALINAS, 1983; FAGERIA, 2001). A acidez apresenta relação direta com a disponibilidade de nutrientes para as plantas (MALAVOLTA, 1979; AZEVEDO et al., 1996; MIRANDA & MIRANDA, 2000). A solubilidade de alguns elementos tóxicos varia de acordo com pH do solo. Para valores inferiores a 5, o alumínio, ferro e manganês se tornam solúveis em quantidades suficientes para atuarem como tóxicos ao desenvolvimento de algumas plantas. Já em valores elevados, o íon bicarbonato aparece em quantidade suficiente para interferir na absorção dos outros íons (BRADY, 1989). Solos ácidos são prejudiciais ao desenvolvimento das raízes das plantas sobretudo por conta da toxidez de alumínio (PAVAN et al., 1982) e deficiência em cálcio (RITCHEY et al., 1982). Segundo Malavolta (2006) a baixa fertilidade encontrada nos solos ácidos deve-se principalmente à pobreza em bases trocáveis e ao excesso de alumínio e manganês.

É importante que o solo, além de conter os nutrientes em suas concentrações ideais, possua uma condição que permita que estes estejam disponíveis para a cultura. O gráfico (**Figura 2**) apresentado por Malavolta (1979) mostra que a maior disponibilidade de grande parte dos nutrientes ocorre no intervalo de pH entre 6 e 6,5, para a maioria das culturas.

Figura 2 - Influência do pH do solo na disponibilidade de nutrientes.
Fonte: MALAVOLTA, 1979.

Os solos agrícolas brasileiros em sua grande maioria apresentam pH inferior a 5,5 (VELOSO et al., 1992), portanto classificados como ácidos. Quaggio (2000) estimou que 70% dos solos agrícolas do Brasil é composto por solos ácidos, capazes de reduzir o potencial produtivo das culturas em cerca de 40%. Destaca-se também a elevada acidez e a deficiência em cálcio dos solos de cerrado, onde vem ocorrendo grande parte da expansão da fronteira agrícola no país. De acordo com Souza et al. (2005), 86% dos solos do cerrado possuem teor de cálcio tão baixo que não permitem o desenvolvimento do sistema radicular da cultura. Vitti e Luz (2001) afirmam que a acidez do solo é um processo natural e inevitável, e que exige correções periódicas para que a produção agrícola se mantenha em níveis adequados, que acontece devido à própria absorção dos cátions pelas raízes, além do tempo de cultivo, em virtude da lixiviação (MALAVOLTA, 2006).

Para neutralizar a acidez do solo são realizadas aplicações de compostos básicos (ALCARDE, 1986), sendo a aplicação de calcário, também conhecida como calagem, a prática mais comum (NOLLA & ANGHINONI, 2004; RAMOS, 2006; NOGUEIRA, 2014) e eficiente (CAIRES et al., 2004). Entre suas principais características estão a elevação do pH, fornecimento de cálcio e magnésio e a neutralização do alumínio tóxico (MASCARENHAS et al., 1976; RHEINHEIMER et al., 2000; AMARAL & ANGHINONI, 2001; RAIJ, 2011; VARGAS, 2017), que propicia maior desenvolvimento do sistema radicular das culturas e melhora a eficiência na absorção dos nutrientes e água presentes no solo (MASCARENHAS et al., 1976; RAIJ, 2011). A aplicação de calcário na superfície cria uma frente de correção da acidez do solo em profundidade, proporcional à dose e ao tempo (CAIRES et al., 2000; RHEINHEIMER et al., 2000). Vários trabalhos mostraram efeitos positivos da calagem superficial em relação à acidez (CAIRES et al., 1998; PÖTTKER & BEN, 1998; CAIRES et al., 1999; RHEINHEIMER et al., 2000; MOREIRA et al., 2001; PETRERE & ANGHINONI, 2001; CIOTTA et al., 2004) e em relação ao retorno econômico (MIELNICZUK, 1983; SIQUEIRA, 1989).

Segundo a Associação Brasileira dos Produtores de Calcário Agrícola (ABRACAL, 2017), o consumo atual de aproximadamente 30 milhões de toneladas de calcário é muito inferior ao necessário, que deveria ser de cerca de 90 milhões de toneladas. Apesar de ser um dado estimado, demonstra que muitos produtores estão produzindo em solos com menor potencial produtivo. A entidade também afirma que a produção agrícola nacional seria maior apenas com a correção da acidez, ou seja, sem a necessidade de aumentar o consumo de outros insumos.

Diversos são os fatores para a aplicação de quantidades diferentes da ideal ou até mesmo a ausência da calagem, apesar de ser um insumo de baixo custo. Envolvem desde falta de informação e recursos financeiros a fatores que muitas vezes estão fora da capacidade do produtor, como a amostragem incorreta do solo, erros no cálculo da

necessidade de calagem, calibração incorreta da máquina distribuidora entre outros. Além disso, tradicionalmente a calagem é realizada com a definição de uma dosagem média para toda a área, desconsiderando a variabilidade espacial existente no solo. Com isso existe sub dosagem em algumas áreas e super aplicação em outras. As técnicas associadas ao conceito de agricultura de precisão tornam-se aliadas nesse quesito, permitindo visualizar a variabilidade da acidez na lavoura por meio de amostragens georreferenciadas para obter o mapa de recomendação de calagem.

Como grande parte da expansão agrícola brasileira tem ocorrido principalmente no cerrado (MAGNI, 2013), com solos naturalmente ácidos (FAGERIA & GHEYI, 1999) e com baixa produtividade em estado natural (FAGERIA & STONE, 1999; SILVEIRA et al., 2000), a calagem é cada vez mais utilizada e necessária. Fageria (2001) afirma que para incorporação desses solos no processo produtivo é indispensável o uso de corretivos, e que a calagem é uma das práticas mais eficazes e menos dispendiosas para correção da acidez do solo.

Já o gesso agrícola é classificado como condicionador de solo e tem sido utilizado com o objetivo de diminuir a toxicidade do alumínio e aumentar a concentração de cálcio em profundidade (RITCHEY et al., 1980; BRAGA et al., 1995; SILVA et al., 1998), por ter maior solubilidade em relação ao calcário (ERNANI, 1986; DIAS et al., 1994; VITTI & PRIORI, 2009). Sua utilização, assim como o calcário, resulta em melhor crescimento radicular e maior absorção de nutrientes (SUMNER et al., 1986; CARVALHO & RAIJ, 1997). Sua eficiência na redução da toxidez por alumínio no subsolo é demonstrada em vários trabalhos (OATES & CALDWELL, 1985; MARSH & GROVE, 1992; CARVALHO & RAIJ, 1997).

2.1.1 Características do calcário agrícola

O calcário é obtido pela moagem de rochas calcárias, compostas principalmente por carbonato de cálcio (CaCO_3) e carbonato de magnésio (MgCO_3), e suas concentrações variam de acordo com as características de cada rocha da qual é obtido.

Um fator de relevante importância para o calcário é sua capacidade de neutralizar a acidez. De acordo com suas características, como composição e tamanho das partículas, ele pode ter maior ou menor capacidade de neutralizá-la, assim como o tempo necessário para que isso ocorra. Para mensurar essas capacidades foram criados os índices poder de neutralização, reatividade e poder de neutralização total.

O poder de neutralização (PN) indica a capacidade potencial ou teórica do corretivo em neutralizar a acidez do solo. Seu valor é expresso em relação à capacidade do carbonato de cálcio, tomado como padrão (ALCARDE, 2005), ou seja, o carbonato de cálcio apresenta PN de 100%. A **Tabela 1** apresenta alguns exemplos, como 1 kg de carbonato de magnésio tem ação equivalente a 1,19 kg de carbonato de cálcio.

Tabela 1 - Capacidade de neutralização de diferentes neutralizantes em relação ao carbonato de cálcio.

Constituintes	Capacidade de neutralização relativa ao CaCO_3
Carbonato de cálcio	1,00
Carbonato de magnésio	1,19
Hidróxido de cálcio	1,35
Hidróxido de magnésio	1,72
Óxido de cálcio	1,79
Óxido de magnésio	2,48
Silicato de cálcio	0,86
Silicato de magnésio	1,00

Fonte: ALCARDE, 1992.

A reatividade (Re) é a velocidade de sua reação no solo. Pode-se dizer que a reatividade é o percentual do corretivo que reage no solo no período de 3 meses, e seu valor depende da granulometria, condições do clima e solo, e da composição química (PRIMAVESI, 2004). Alcarde (1992) apresentou em seu estudo a relação entre o tamanho das partículas e a reatividade, concluindo que quanto menores as partículas, maior será a área de contato e mais rápida será a reação com o solo.

Tabela 2 - Taxas de reatividade para partículas de diferentes tamanhos.

Fração granulométrica		Taxa de reatividade (Re) (%)
Peneira N° (ABNT)	Dimensão (mm)	
Maior do que 10	Maior do que 2	0
22 -10	2 a 0,84	20
20 - 50	0,84 a 0,3	60
Menor do que 50	Menor do que 0,3	100

Fonte: ALCARDE, 1992.

O poder de neutralização (PN) e reatividade (Re), isolados, não possibilitam a adequada avaliação da ação do corretivo. Por isso foram associados, dando origem ao índice poder de neutralização total (PRNT) (ALCARDE, 2005), dado pela Equação 1:

$$PNRT = PN \times Re \quad (1)$$

A legislação brasileira (Instrução Normativa nº 35 de 2006 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)) determina um valor mínimo de 67% para PN e 45% para PRNT. Também classifica o calcário em faixas de acordo com o valor do PRNT:

- faixa A – calcário com PRNT entre 45 e 60%;
- faixa B – calcário com PRNT entre 60,1 e 75%;
- faixa C – calcário com PRNT entre 75,1 e 90%;
- faixa D – calcário com PRNT acima de 90,1%.

A respeito da granulometria, a legislação brasileira exige que os corretivos de acidez possuam partículas que deverão passar em sua totalidade em peneira de 2 mm (ABNT nº 10), mínimo de 70% em peneira de 0,84 mm (ABNT nº 20) e mínimo de 50% em peneira de 0,3 mm (ABNT nº 50). E para conter a expressão ultrafino “*filler*”, sua totalidade deverá passar na peneira 0,3 mm (ABNT nº 50).

2.2. Máquinas distribuidoras

Devido às diversas configurações de máquinas distribuidoras existentes no mercado, estas podem ser classificadas de diferentes formas: quanto à fonte de potência, forma de deposição, quanto ao mecanismo dosador e distribuidor, e quanto à forma de acoplamento.

Balastreire (1987) classifica as máquinas quanto à fonte de potência para acionamento como: manuais, acionadas e transportadas pelo operador; de tração animal, que utiliza potência gerada por um ou mais animais; motorizadas, onde um motor é o encarregado de fornecer potência; tratorizadas, na qual um trator é o responsável por fornecer potência para o acionamento além da sustentação do equipamento; auto propelidas, máquinas especificamente projetadas, com motor e transmissão próprios, geralmente em um chassi com vão livre para permitir a passagem sobre culturas já desenvolvidas; e aéreas, utilizadas em aviões ou helicópteros.

Outra classificação é quanto à forma de acoplamento. Quando acionadas pelo trator, as máquinas aplicadoras podem ser classificadas como: montadas, quando fixa no engate de três pontos do sistema de levante hidráulico; semi-montadas quando acoplada aos dois pontos inferiores do sistema de levante hidráulico; e de arrasto, quando acoplada à barra de tração do trator agrícola (BALASTREIRE, 1987). Em todos os casos, o acionamento será mecânico via tomada de potência (TDP) ou hidráulico a partir de potência hidráulica gerada pelo trator. As máquinas também podem ser autopropelidas, o que vem se tornando mais comum no Brasil nos últimos anos.

As máquinas adubadoras também são classificadas quanto à forma de deposição do produto, em três grupos (MIALHE, 1980): em faixa, em linha e a lanço. Na distribuição em faixa (**Figura 3, 1**) o material é depositado sobre o solo sem que ocorra seu lançamento e a largura efetiva é a própria largura da máquina. Da mesma maneira ocorre a distribuição em linha (**Figura 3, 2**), porém aplicando o material apenas em algumas linhas, normalmente no interior de sulcos. Na distribuição a lanço (**Figura 3, 3**) existe o lançamento das partículas pelo mecanismo distribuidor. Com isso atinge-se larguras de aplicação superiores à largura da máquina, o que permite, normalmente, um menor tráfego sobre a lavoura por cobrir uma maior área a cada aplicação. Segundo Hachuy (2008), uma vantagem da distribuição a lanço é sua maior capacidade operacional, realizando aplicações em uma maior área por unidade de tempo, porém com inconveniente da dependência da sobreposição de passadas para definição da largura efetiva e a dificuldade em se obter uma aplicação uniforme.

Figura 3 - Tipos de distribuição em faixa (1); em linha (2); a lanço (3).
Fonte: Adaptado de MIALHE, 1987.

A adubadora é composta basicamente por três componentes principais: reservatório, mecanismo dosador e mecanismo distribuidor (BALASTREIRE, 1987; GADANHA JR et al., 1991). O reservatório é o local onde o produto a ser distribuído fica armazenado. Sua capacidade tem elevada importância pois determinará, junto com a taxa de aplicação, a autonomia da máquina. Deve-se também considerar o peso total do conjunto. Um reservatório de grande capacidade, apesar de permitir maior autonomia, necessita de maior potência para ser transportado ou tracionado, além de poder causar compactação do solo, o que não é desejável. Outro fator que deve ser analisado durante o projeto é o ângulo de inclinação das paredes laterais, que deve ser sempre maior do que o ângulo de repouso do produto para que haja escoamento adequado.

O mecanismo dosador é responsável por alimentar o mecanismo distribuidor (GADANHA JR et al., 1991), retirando determinada quantidade do reservatório, definindo assim a vazão. Esse valor, aliado à velocidade e à largura de aplicação, define a taxa de aplicação (dose de deposição) da distribuidora. Pode ser dividido em dois grupos: gravitacionais, onde a gravidade com o auxílio de um agitador mecânico é a responsável por provocar o escoamento do produto através de um ou mais orifícios de abertura variável; e volumétricos, onde uma quantidade determinada de material é retirada e entregue ao mecanismo distribuidor através de esteiras, parafusos helicoidais, rotores denteados, acanalados ou correias transportadoras (**Figura 4**). Esse mecanismo tem a possibilidade de estar ligado ao sistema de transmissão da máquina para que a vazão seja proporcional à velocidade (KARPINSKI JR, 2015). Em um estudo

realizado por Coelho et al. (1992a), com máquinas comerciais, verificou-se a inaptidão do mecanismo dosador gravitacional em fornecer grandes vazões. Este é destinado a fertilizantes granulados e em baixas vazões e normalmente associado a máquinas montadas no engate de três pontos de tratores. Segundo os autores, os dosadores volumétricos apresentam maior eficiência em relação aos gravitacionais.

Figura 4 - Exemplos de mecanismos dosadores: volumétrico, por esteira (1) e comporta (2), (A); gravitacional, por abertura de orifícios (3) (B); volumétrico, através de parafuso helicoidal (C).

Fonte: Adaptado de COELHO et al., 1992 (A); adaptado de MIALHE, 1987 (B), (C).

O mecanismo distribuidor é o responsável por definir a forma e largura de deposição do produto sobre o solo. Portanto a qualidade da aplicação é dependente deste mecanismo e a maior dificuldade encontra-se em conseguir distribuição uniforme aliada a bons valores de largura efetiva de aplicação. MIALHE (1996) os classifica conforme seu princípio de operação: queda livre, centrífugo, movimento pendular ou inercial, e pneumático. Em queda livre o produto, depois de dosado, é depositado em linhas na superfície ou no interior de sulcos no solo apenas pela ação da gravidade. Nesse modelo não é necessário determinar uma sobreposição da faixa aplicada, já que a largura efetiva de aplicação corresponde à largura da máquina, com distribuição homogênea (GADANHA JR et. al., 1991).

Figura 5 - Croqui de um distribuidor no qual a deposição é feita por queda livre.

Fonte: Adaptado de SMITH et al., 1994.

Nos distribuidores de força centrífuga utiliza-se um ou dois discos rotativos com aletas, responsáveis pelo lançamento radial do produto. Nos mecanismos pendulares um tubo realizando movimento oscilatório horizontal determina o caminhamento das partículas ao longo de seu comprimento pela ação da inércia até seu lançamento (MIALHE, 1996). Na distribuição pneumática, uma corrente induzida de ar é responsável por distribuir o produto.

Figura 6 - Distribuidores a lanço: centrífugo monorotor (A), pendular (B).

Fonte: Adaptado de Manual de instruções e peças Lancer, JAN, 1991 (A); adaptado de BALASTREIRE e COELHO, 1992 (B).

Os distribuidores centrífugos são os mais utilizados atualmente na aplicação de fertilizantes e corretivos (KARPINSKI JR, 2015), apesar de apresentar alguns inconvenientes, como a dificuldade de calibração e a variação do comportamento com as características do produto e as condições da aplicação (SILVA, 2011). O modelo centrífugo com dois discos girando em sentidos opostos foi uma maneira de diminuir a assimetria que acontece nos modelos de um rotor (BERNACKI et al., 1972; DALLEMEYER, 1985; ORTIZ- CAÑAVATE, 1985).

A utilização de modelos com mecanismo distribuidor gravitacional, também conhecidos como queda livre, também vem crescendo. Têm como grande vantagem a maior homogeneidade na aplicação e, por não ocorrer nenhum tipo de lançamento, apenas a queda do produto após a dosagem realizada por um mecanismo volumétrico de esteira transportadora e comporta, são capazes de garantir certa uniformidade de aplicação; além de reduzir o efeito da deriva do material. Nesses modelos a largura de aplicação é bem definida, equivalente à própria largura da esteira, e não há a necessidade de sobreposição entre as passadas, porém apresentam como principal inconveniente a necessidade de rodar a lavoura, uma vez que o material é aplicado apenas na área sob ela. Recentemente, surgem no mercado máquinas com esta configuração, porém de grande largura (**Figura 7**).

Figura 7 - Distribuidor gravitacional (queda livre) realizando a calagem (Stara, Super Bruttus).

Fonte: Prospecto Super Bruttus, Stara, 2017.

2.3. Distribuidora pendular

Distribuidores pendulares são assim nomeados devido ao seu mecanismo distribuidor: um tubo que realiza movimentos oscilatórios no plano horizontal, impulsionando as partículas até a saída do sistema (Ortiz-Cañavate, 2003). Seu funcionamento baseia-se na rotação proveniente da TDP de um trator, não existindo modelos acionados por motores hidráulicos ou elétricos. No mercado brasileiro, são predominantemente montados no engate de três pontos

do trator e com reservatórios de até 1300 kg. O mecanismo dosador é exclusivamente gravitacional com agitador mecânico e a vazão é regulada de acordo com a abertura de orifícios. A taxa de aplicação está no intervalo de 10 a 2000 kg ha⁻¹ de acordo com os modelos e fabricantes (Vicon, JF, Nogueira, Land Pride).

Em relação à largura de aplicação os fabricantes informam valores de até 14 m, e que esse valor depende basicamente do peso específico do material a ser distribuído. Partículas com maior massa são capazes de adquirir maior energia cinética e atingir maiores distâncias. Tal fato pode causar inclusive segregações ao longo da largura, principalmente no caso de fertilizantes compostos como apresentado em um estudo realizado por Molin et al. (2009). Neste trabalho, os autores utilizaram um distribuidor centrífugo, porém o resultado seria semelhante para o pendular uma vez que ambos realizam o lançamento das partículas. Para o calcário, devido à pequena massa das partículas, fabricantes informam larguras de cerca de 6 m, sem referência ao coeficiente de variação.

Apesar de ter sido negligenciado por parte das indústrias e pesquisadores, fato que refletiu em pequenos investimentos e pequena participação no mercado, os distribuidores de princípio pendular possuem algumas vantagens potenciais em relação aos modelos centrífugos, mais utilizados atualmente. Possuem um padrão teoricamente livre de desigualdades e sem necessidade de ajustes devido ao seu movimento simétrico (PARISH & BERGERON, 1991; COELHO et al., 1992b; PARISH, 1995a), melhor uniformidade na aplicação (PARISH, 1995b), e permitem realizar aplicações com diferentes larguras ou em faixas separadas, de acordo com as características do pêndulo. Além disso, seu funcionamento causa menos impacto ao material durante a aplicação, de acordo com Mhrar (1997), conforme citado por Mursec e Ploj (2000).

A **Figura 8** apresenta o croqui de uma distribuidora pendular da década de 1980, com destaque para seus principais componentes. Comparando com os modelos fabricados atualmente, nota-se que praticamente não ocorreram mudanças na construção e todos os modelos possuem mecanismo dosador gravitacional, destinado a granulados em baixas vazões e com regulagem através da abertura de orifícios em uma placa, reservatório com baixa capacidade, e pêndulo de pequena dimensão, incapaz de fornecer grandes vazões.

Figura 8 - Distribuidor pendular e seus principais componentes: reservatório (1), mecanismo dosador (2), agitador (3), alavanca reguladora do mecanismo dosador (4), pêndulo(5).
Fonte: MIALHE, 1987.

O pêndulo é o mecanismo distribuidor deste princípio de distribuidora, portanto suas características definem o padrão da faixa de distribuição. Seu movimento oscilante determina o lançamento das partículas em duas áreas simétricas (**Figura 9**) (GADANHA JR et al., 1991).

Figura 9 - Croqui do princípio de funcionamento do mecanismo pendular.
Fonte: adaptado de LUZ, 1989.

Essas duas áreas simétricas (**Figura 9**) produzem um perfil de distribuição com maior quantidade de material nas extremidades da largura, momento no qual ocorre a inversão de movimento do pêndulo, podendo ser assim utilizado para aplicações em faixas, junto aos pés das árvores, por exemplo. Para evitar essa característica, criou-se o defletor, peça fixada à extremidade do pêndulo que, segundo Hofstee (1995), tem a incumbência de transformar o padrão de dois picos de deposição em um mais homogêneo. A **Figura 10** ilustra a influência do defletor no perfil da distribuição.

Figura 10 - Influência do defletor na deposição do material.
Fonte: Adaptado de Manual Vicon, 2018.

Hofstee (1995) define o pêndulo (**Figura 11**) como uma peça tubular convergente e ligeiramente oval, feita de nylon reforçada com fibra de vidro e que pode, ou não, ser equipada com um defletor (**Figura 11, A**) em sua extremidade. A “ponte” (**Figura 11 B**) no centro do defletor possui um ângulo de 45° em relação à horizontal e tem como função criar uma componente vertical da velocidade para parte do fluxo, aumentando a distância de lançamento.

Figura 11 - Pêndulo equipado com defletor (A) em sua extremidade, com destaque para a "ponte" (B).
Fonte: Adaptado de manual do operador distribuidora pendular PFS400, Land Pride, 2017.

A conversão da rotação proveniente da TDP do trator em movimento horizontal é realizada por meio de um conjunto composto por volante, garfo e mancal excêntrico (**Figura 12**), produzindo um movimento simétrico em relação ao centro da máquina. Ressalta-se que não existe redução ou controle de rotação. Todos os modelos trabalham com rotação fixa, a partir do padrão de rotação fornecida pela TDP.

Figura 12 - Peças responsáveis por transformar a rotação proveniente da TDP em movimento oscilatório horizontal. Fonte: Adaptado de “Adubadora – semeadora pendular” Manual de instruções e catálogo de peças, Vicon, 2016.

O movimento do pêndulo é descontínuo, com acelerações e desacelerações. Possui velocidade nula nas extremidades do movimento e atinge a velocidade máxima na metade da amplitude angular (centro). Tomando como referência o volante, o pêndulo atinge velocidades nula nas posições 0 e 180° e velocidades máximas nas posições 90° e 270° (**Figura 13**).

Figura 13 - Relação entre posição do volante e velocidade angular do pêndulo.

Devido ao seu movimento simétrico, os distribuidores pendulares apresentam distribuição teoricamente sem desigualdade entre os lados de deposição (PARISH & BERGERON, 1991; COELHO et al., 1992b; PARISH, 1995a). Apesar da teórica simetria, estudos revelaram que pequenas desigualdades, na ordem de 2% a 5%, ocorrem com frequência neste tipo de distribuidor (PARISH, 1995a; PARISH, 1995b). Parish (1995a) ensaiou três diferentes tamanhos de partículas e concluiu que a assimetria na distribuição aumenta conforme a massa das partículas diminui, chegando a 8%, sem que seja apresentada uma explicação para tal fato; inclusive nenhum modelo pendular de mercado possui ajustes para essa finalidade. O autor afirma que essa pequena assimetria é praticamente a mesma encontrada em distribuidores centrífugos regulados, e bem inferiores aos encontrados nos modelos sem a devida calibração. Parish e Chaney (1986) ensaiaram um distribuidor centrífugo e encontraram desigualdades que variaram de 4% a 13%. Por

outro lado, Parish (1987) concluiu que um distribuidor centrífugo pode ser regulado para distribuir com desigualdades de 1%. De acordo com Parish (1995a), pode-se afirmar que os distribuidores pendulares apresentam um perfil com maior ou igual simetria em relação aos distribuidores centrífugos, com a vantagem de não necessitar ajustes.

As aplicações são realizadas seguindo principalmente dois tipos de percurso: alternado e contínuo. Como nas aplicações a lanço é necessária certa sobreposição entre as passadas, o tipo de percurso tem relevância quando existe alguma assimetria na distribuição e a avaliação da deposição cumulativa depende do tipo de percurso adotado (GADANHA JR et al., 1991). O percurso alternado (**Figura 14 A**) é o mais utilizado e de mais simples execução, também conhecido como “vai-e-vem”, uma vez que as aplicações são realizadas em passadas subsequentes e com giros nas cabeceiras dos talhões. Nesse percurso existe a sobreposição do mesmo lado de deposição da máquina, ou seja, o lado direito de parte da faixa de deposição numa passada recobre o mesmo lado direito de parte da faixa de deposição da passada anterior; o mesmo acontece com o lado esquerdo. Dessa maneira qualquer assimetria causada pela máquina é maximizada, sendo uma desvantagem desse tipo de percurso. O percurso contínuo (**Figura 14 B**) é realizado “abrindo ou fechando o quadro” e necessita de um planejamento prévio. Neste, existe a sobreposição de lados opostos de deposição da máquina, ou seja, lado esquerdo de parte da faixa de deposição numa passada recobre o lado direito de parte da faixa de deposição da passada anterior, e vice-versa, atenuando possíveis assimetrias da máquina. Via de regra, o circuito contínuo apresenta tendência para “corrigir” as imperfeições, enquanto que o circuito alternado as amplifica (GADANHA JR et al., 1991).

Figura 14 - Croquis dos tipos de circuitos mais utilizados na aplicação de fertilizantes e corretivos: circuito alternado (A); circuito contínuo, com giros nas cabeceiras do talhão (B).
Fonte: Adaptado de Manual Adulção 3.1.

A principal vantagem da simetria na aplicação é permitir que o coeficiente de variação (CV) da quantidade de produto distribuído transversalmente seja o mesmo independente do tipo de percurso. Uma distribuidora capaz de distribuir de forma simétrica tem grande vantagem nesse quesito.

Outro fator de relevante influência na largura de aplicação é a amplitude angular do pêndulo, que tem relação direta com o diâmetro do volante: quanto maior seu diâmetro, maior a amplitude e consequentemente maior a distância de lançamento das partículas. Buscando outras formas de variar a largura de aplicação surgiram os modelos com diferentes posições de fixação do mancal. Quanto mais próxima do centro do mancal estiver a fixação, menor a amplitude angular do movimento do pêndulo e consequentemente menor a distância de lançamento. Segundo o fabricante, cada avanço na posição (**Figura 15**) pode variar em até 10% a largura de deposição, dependendo do material aplicado.

Figura 15 - Volante com diferentes posições para fixação do mancal.

Fonte: Adaptado de “Adubadora – semeadora pendular” Manual de instruções e catálogo de peças, Vicon, 2016.

De acordo com Silva (1991) e Hofstee (1995) é possível variar a velocidade e amplitude angular do pêndulo, para uma rotação fixa na TDP, através da variação da relação entre o raio do mancal em relação ao centro do volante e a distância entre a fixação do garfo e o centro do volante, conforme mostra a **Figura 16**.

Figura 16 – Relação entre o raio do centro do mancal ao centro do volante e a distância entre a fixação do garfo e o centro do volante.

Fonte: Adaptado de SILVA (1991).

Mursec e Ploj (2002) estudaram a influência da rotação da TDP na largura de trabalho e vazão para um distribuidor pendular e um distribuidor centrífugo monorotor. Os autores realizaram testes aplicando fertilizante granulado em três diferentes rotações: 290, 410 e 540 rpm, e concluíram que a rotação influenciou na distância para ambos os modelos, mas de forma mais relevante no modelo pendular, e a vazão variou estatisticamente apenas para o modelo pendular. Os autores relatam também que a 540 rpm o distribuidor centrífugo quebrou parte das partículas de fertilizante devido ao forte impacto com as aletas. A **Figura 17** mostra a relação entre a largura obtida e a rotação de funcionamento encontrada pelos autores para o modelo pendular, na qual se observa que quanto maior a rotação utilizada na TDP, maior a largura obtida. A rotação máxima utilizada pelos autores foi a rotação nominal da distribuidora, 540 rpm, e não houve nenhuma consideração quanto à qualidade da aplicação.

Figura 17 - Relação entre a rotação da TDP e a largura de trabalho em uma distribuidora pendular.

Fonte: MURSEC E PLOJ (2002).

Bahaosean e Brouns (1988) analisaram possibilidades de aumentar a largura de distribuição e explicam que modificações na cinemática da máquina, como maior frequência ou maior ângulo de oscilação, são quase impossíveis, pois um aumento linear dessas variáveis resultaria em aumento quadrático das forças que agem sobre o pêndulo e, portanto, seria necessária a fabricação de uma estrutura mais resistente. Os autores ainda afirmam que a única possibilidade de aumentar a largura de distribuição seria através da modificação na construção, de forma que as partículas fossem lançadas com uma componente vertical da velocidade. Em seu estudo, objetivando aumentar a largura de distribuição, modificaram a montagem do pêndulo de modo que este fizesse um ângulo de 40° com o plano horizontal. Também mantiveram o pêndulo no plano horizontal e colocaram um disco em sua saída com um ângulo, também, de 40° com a horizontal. Ambos os experimentos apresentaram aumento da distância de lançamento de partículas granuladas de fertilizantes, de 7 m para cerca de 10 m, porém o estudo não considerou a qualidade da distribuição.

2.4. Ensaios para determinação da largura efetiva de aplicação

A definição da largura efetiva de uma aplicação tem elevada importância na distribuição de fertilizantes, responsável por definir qual deverá ser o espaçamento entre as passadas para garantir que toda a área receba o material na dosagem desejada. É determinada como função de uma regularidade mínima na dosagem obtida a partir de uma dada sobreposição com passadas adjacentes (GOLÇALVES et al., 2001).

O procedimento normalmente utilizado para definição da largura efetiva é por meio de ensaios padronizados que simulam a aplicação. Nestes, coletores são dispostos transversalmente ao sentido de movimento da distribuidora, cobrindo toda a faixa de aplicação com exceção do local de passagem dos rodados. Após a distribuição as quantidades coletadas são mensuradas e posteriormente analisadas. O espaçamento entre coletores irá definir a resolução do resultado, sendo que quanto menor o espaçamento entre os coletores, maior a sua resolução, porém mais oneroso será o ensaio. Coletores de pequena largura, dispostos lado-a-lado e encostados, com espaços apenas onde irá passar o rodado, é a configuração que apresenta a maior resolução possível, porém, é a que mais demanda esforços e tempo, considerando que o material de cada coletor deve ser pesado. Também existe a possibilidade de automação do processo de coleta e pesagem do material de cada coletor, especialmente utilizado por fabricantes europeus de máquinas adubadoras a lança. O exemplo da **Figura 18** ilustra a configuração de uma lacuna das mesmas dimensões dos coletores entre os coletores. Essa configuração utiliza praticamente metade dos coletores em relação à configuração sem espaçamentos e demanda, consequentemente, menos tempo. Apesar disso garante boa representatividade e é bastante utilizada.

Figura 18 - Modelo esquemático da disposição dos coletores nos ensaios de largura de aplicação, na configuração de uma lacuna, da mesma dimensão do coletor, entre os coletores.

O procedimento normalmente utilizado para determinar a largura efetiva baseia-se no CV (MOLIN & RUIZ, 1999). A largura é definida através da simulação de diferentes recobrimentos com os valores acumulados nos coletores. Com isso tem-se um CV para cada simulação de recobrimento, ou seja, valores de CV para as diferentes larguras efetivas simuladas. No campo deverá ser utilizada uma largura efetiva de aplicação com um valor prático, aliado a um baixo CV (MOLIN & RUIZ, 1999).

Os ensaios para definição da largura efetiva raramente são realizados pelo agricultor devido à sua complexidade, demanda de tempo, conhecimento e necessidade de materiais específicos (GRIFT et al., 1997; COINTAULT et al., 2002; VANGHEYTE et al., 2007). Pode-se citar sua ausência como um dos motivos para a baixa qualidade das aplicações. Sem o conhecimento da largura real de aplicação, o agricultor se baseia na informação fornecida pelo fabricante ou muitas vezes apenas na estimativa visual para fazer o recobrimento. Larguras diferentes da ideal resultam em aplicações desuniformes, com áreas que recebem maior ou menor quantidade de insumos do que o necessário.

Para a realização dos ensaios existem duas normas de consenso internacional, a norma ASABE 341.5 (ASABE, 2018) e a norma ISO 5690/1 (ISO, 1982), que definem procedimentos, recomendações e estabelecem condições para a determinação da largura de trabalho, como velocidade máxima do vento, quantidade mínima de produto no reservatório, análise granulométrica, precauções para evitar o ricochete de partículas, altura máxima do topo das bandejas coletoras de acordo com a altura da descarga do distribuidor, entre outras. Ambas seguem basicamente o mesmo escopo, mas diferem em relação às dimensões dos coletores. A norma ISO prevê coletores padronizados de 1000 mm x 250 mm ou de 500 x 500 mm e profundidade mínima de 150 mm para ambos. Pela norma ASAE, os dispositivos de coleta devem possuir largura mínima inferior a 10% da largura efetiva prevista, o comprimento deve ser maior ou igual à largura, com um valor mínimo de 300 mm, e a espessura máxima das paredes dos coletores deve ser de 2,3 mm. Ambas as normas se baseiam no CV de sucessivos recobrimentos para a determinação da largura efetiva de trabalho, mas não fixam um valor limite. Também não há unanimidade entre os pesquisadores sobre esse valor. Pimentel (1987) considerou coeficientes de variação abaixo de 10% como baixos, entre 10 e 20% como normais, entre 20 e 30% como altos, e acima de 30% como muito alto. Para Weiss (1986) o grau de uniformidade na distribuição é muito bom quando apresenta coeficiente de variação de até 10%, bom até 20%, regular até 33% e pobre acima de 33%. Campos (1984) considerou coeficientes de variação entre 10 e 20% como normais para ensaios de campo com fertilizantes granulados. Ortiz-Cañavate e Hernáiz (1989) estimam que coeficientes de variação de aproximadamente 20% são satisfatórios para adubos granulados, e para pós, 30%. Yule e Crooks (1989) verificaram que algumas áreas de lavoura de trigo receberam 40% a mais de fertilizantes que o recomendado com um CV de 29%.

Segundo Molin e Mazzotti (2000), apesar da norma ISO determinar o tamanho dos coletores, pode-se utilizar coletores de outras dimensões desde que todos tenham as mesmas dimensões. Também concluíram que o ricochete de partículas é influenciado pela natureza física das partículas. Quanto maior a massa da partícula, maior a possibilidade de ricochete. Segundo os autores, em ensaios com calcário em coletores plástico, o uso de dispositivos para evitar ricochetes mostrou-se dispensável, resultado diferente do encontrado para ureia, onde mostrou-se necessário sua utilização.

Para o processamento dos dados de ensaio da análise da distribuição transversal, Molin et al. (1992) propuseram o programa ADULANÇO, que simula larguras de trabalho, calcula os respectivos valores de CV e gera os resultados. Atualmente o programa está na versão 3.1 (2015), elaborado em planilha eletrônica. Os dados são introduzidos e, após a análise, os resultados são apresentados em formas de gráficos e planilha, de fácil visualização. A

Figura 19 exemplifica um resultado gerado pelo ADULANÇO 3.1, um gráfico de CV x Largura para cada tipo de percurso (alternado e contínuo). Através dessa informação e com um CV alvo, define-se a largura de trabalho. A largura utilizada no campo deverá ser aquela com valor plausível aliada a um valor baixo de CV.

Figura 19 - Exemplo de gráfico CV% *versus* Largura, gerado pelo programa Adulanço 3.1 (2015), utilizado para determinação da largura efetiva.

Para evitar a necessidade da realização de ensaios, autores estudaram, de diversas maneiras, a balística das partículas a fim de determinar a largura de lançamento e qualidade da aplicação de fertilizantes. Esse tipo de análise permite, muitas vezes, notar qual a influência de cada variável isoladamente, principalmente quando o movimento da partícula pode ser definido através de uma equação. Os estudos foram, em sua maioria, focados em modelos analíticos para a trajetória das partículas. Diversos autores (PATTERSON & REECE, 1962; INNS & REECE, 1962; MANNEL & REECE, 1963; CUNNINGHAN, 1963) desenvolveram modelos analíticos para determinar o movimento de partículas esféricas em um disco de uma distribuidora centrífuga. Os resultados foram bons para esferas de rolamento, mas ruins para fertilizantes de formato irregular. Pitt et al. (1982) simplificaram as equações de movimento e geraram uma expressão analítica para o cálculo da distância percorrida por uma partícula após seu lançamento. Esses modelos foram incorporados em estudos realizados por Griffis et al. (1983) e Olieslagers et al. (1996) para prever o local de queda das partículas. Ambos os trabalhos encontraram grandes discrepâncias entre os resultados previstos e o experimental, e concluíram que a interação entre partículas, o contato com o disco e a quantidade imprevisível de partículas em contato com as aletas não conseguem ser definidos através de equações. Hofstee (1994) utilizou um transdutor ultrassônico para determinar a velocidade e direção de saída de partículas em um distribuidor centrífugo. Dintwa et al. (2004) e Aphale et al. (2003) também desenvolveram modelos analíticos baseados em equações de movimento para prever a trajetória de uma partícula em um disco centrífugo com aleta reta, calculando estatisticamente o perfil da distribuição através de trajetórias individuais com diferentes condições iniciais, também não considerando a interação entre partículas.

O Método dos Elementos Discretos (DEM) considera as interações entre partículas e foi utilizado por alguns pesquisadores. Estudos realizados por Tijssens et al. (2005) e Van Liedekerke et al. (2005) apresentaram bons resultados para baixas rotações do disco (inferiores a 300 rpm), porém foram encontradas maiores diferenças entre os valores teóricos e reais quando utilizou-se rotações mais elevadas, e mais próximas dos valores práticos (VAN

LIEDERKERKE et al., 2006; VAN LIEDEKERKE et al., 2009). Todos os autores citados estudaram a balística de partículas lançadas por distribuidores centrífugos, não tendo encontrada nenhuma análise para distribuidor pendular. Uma possível razão para isso é que a rotação constante dos discos é um fator que facilita a modelagem dos modelos centrífugos, característica diferente dos pendulares. Além disso, existe a trajetória da partícula por todo interior do tubo antes de seu lançamento, período em que existe interação entre partículas e a parede do tubo; fatores que tornam ainda mais complexa sua modelagem. No entanto localizou-se o trabalho de Silva (1991), que propôs equações de balística para distribuidores pendulares. O autor adaptou as equações propostas por Pitt et al. (1982), desenvolvidas para distribuidores centrífugos e estabeleceu que a distância de lançamento de uma partícula lançada por um distribuidor pendular pode ser calculada através de uma série de equações:

A distância de lançamento é calculada pela Equação 2:

$$Z = A \times \ln(V \times \frac{t}{A} + 1) \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

Z: distância de lançamento da partícula pelo tubo, m;

A: constante de resistência do ar;

t: tempo de queda da partícula, s;

V: velocidade de lançamento da partícula, m s⁻¹, e é calculada pela Equação 3:

$$V = \sqrt{\Omega^2 + Rt^2 + U^2} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

Ω : velocidade angular da tomada de potência, rad s⁻¹;

Rt: raio efetivo do tubo, m;

U: velocidade radial da partícula, rad s⁻¹, calculada pela Equação 4:

$$U = \Omega \times Rt \times \sqrt{(\mu^2 + 1) - \mu} \quad \text{Equação 4}$$

Em que μ é coeficiente de atrito entre a partícula e a parede do tubo.

O tempo de queda da partícula é calculado pela Equação 5:

$$t = \sqrt{2 \times \frac{y}{g}} \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

t: tempo de queda da partícula, s;

y: altura do disco em relação ao solo, m;

g: aceleração da gravidade, m s⁻²;

A constante A de resistência do ar é calculada de acordo com a Equação 6:

$$A = \frac{8 \times \gamma_p \times \delta}{3 \times \gamma_a \times Cd}$$
Equação 6

Em que:

γ_p : peso específico da partícula, kgf m⁻³

γ_a : peso específico do ar, kgf m⁻³

δ : raio médio da partícula, m

Cd : coeficiente aerodinâmico da partícula

Nota-se algumas limitações nesse modelo. As equações consideram, em uma mesma equação, variáveis com diferentes unidades; numericamente o aumento da altura de lançamento resultaria sempre em uma maior largura de aplicação, mas sabe-se que, independente da altura, as partículas possuem energia cinética somente para uma determinada distância horizontal, e a partir de um certo valor, o incremento da altura não irá representar mais aumento na distância horizontal. O valor do comprimento do pêndulo seria o fator de maior impacto, já que aparece duas vezes como variável na equação final da distância de lançamento. Apesar do modelo não apresentar bons resultados quando comparado à realidade, é possível notar as variáveis que influenciam o lançamento de uma partícula por um distribuidor pendular: velocidade angular, que está diretamente ligada à rotação da TDP; comprimento e amplitude angular do pêndulo; altura do pêndulo em relação ao solo; material que é composto o pêndulo, devido ao coeficiente de atrito entre as partículas e o pêndulo; densidade do material e inclinação do pêndulo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Os métodos utilizados para prever a distância de lançamento através do estudo da balística das partículas não se mostraram como uma boa opção para o projeto. Diversos autores relataram discrepâncias entre os valores teóricos e reais, e sua utilização não eliminaria a necessidade de ensaios reais para a validação. Portanto, neste trabalho, optou-se por ensaios reais, sem simulações. Apesar disso, as equações apresentadas na literatura (Silva, 1991; Hofstee, 1995) serviram como referência para tomada de decisões, uma vez que indicam qual o efeito de determinada modificação. Por exemplo, a velocidade de lançamento da partícula aumenta com o incremento da frequência, resultando em maiores distâncias; o aumento da altura de trabalho resulta em um tempo maior de voo das partículas, resultando, também, em maiores distâncias de lançamento; a velocidade angular tem relação direta com o diâmetro do volante e a distância do volante até o ponto de ligação com o pêndulo; comprimento do pêndulo tem relação com a velocidade final de lançamento; a partícula é lançada com uma velocidade composta por uma componente horizontal e uma componente vertical, que sofrem influência do coeficiente de resistência aerodinâmica da partícula e da gravidade, no caso da componente vertical. Essas informações foram avaliadas quando se optou por quais variáveis seriam analisadas no estudo.

Para a realização dos ensaios desenvolveu-se um protótipo com base em uma distribuidora centrífuga de arrasto Tatu modelo DCA 5500 (Marchesan, Matão, SP), com reservatório de 2,3 m³ e mecanismo dosador volumétrico por esteira transportadora e comporta. Segundo o fabricante, com a comporta na posição mais elevada, a esteira é capaz de transportar 9,82 kg s⁻¹ de calcário seco. Um estudo realizado previamente no Laboratório de Agricultura de Precisão da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” obteve 12,3 kg s⁻¹ como vazão máxima.

A distribuidora teve seu mecanismo distribuidor centrífugo retirado (**Figura 20**) e substituído por um mecanismo distribuidor pendular reconstruído para maiores vazões. A construção deste partiu-se de um mecanismo distribuidor pendular disponível, da distribuidora PS600 (Vicon, Cotia, Brasil) (**Figura 21 A**), originalmente desenvolvida para aplicações de fertilizantes granulados, calcário e sementes. Dessa maneira, foram utilizadas a estrutura, reservatório e mecanismo dosador da distribuidora Tatu DCA 5500, e as peças responsáveis pelo acionamento do pêndulo (volante, mancal, garfo e estrutura responsável pela sustentação do conjunto) (**Figura 21 B**) provenientes da distribuidora Vicon PS600.

Figura 20 - Distribuidora DCA 5500 sem o mecanismo distribuidor. Modelo forneceu o reservatório e mecanismo dosador, que se enquadravam às propostas do projeto.

Figura 21 – Distribuidora pendular PS600 (A) que serviu como base para ao projeto, da qual foram obtidas as peças responsáveis pelo acionamento do pêndulo (B).

Os dois eixos verticais à frente do volante não possuem função estrutural, porém não foram removidos para não danificar a estrutura original e permitir novamente a montagem. As peças retiradas da distribuidora pendular compõem o mecanismo responsável por transformar o movimento circular originário da TDP em movimento horizontal.

Para direcionar o produto proveniente do mecanismo dosador para o mecanismo distribuidor foi projetado e fabricado um funil (**Figura 22**) que se adequasse tanto à estrutura da distribuidora quanto ao novo tamanho do bocal de saída. Foi soldada sob seu fundo uma base com um rolamento de esferas para permitir a movimentação no plano horizontal. Essa mesma base é presa ao garfo, também por meio de rolamentos. O dimensionamento da parte inferior do funil considerou a movimentação do garfo durante o funcionamento da nova distribuidora, de modo a não permitir o contato (choque) entre eles, e o diâmetro da parte superior foi limitado pelo espaço disponível.

Figura 22 - Funil projetado para direcionar o material proveniente do mecanismo dosador para o pêndulo.

As dimensões do funil são apresentadas na **Figura 23**. Ressalta-se que o comprimento do pêndulo é normalmente calculado em relação ao ponto de rotação (vide equações propostas por Silva (1991)), porém o valor que efetivamente tem influência no lançamento das partículas é aquele relativo à distância percorrida pelas partículas no interior do tubo, período no qual são aceleradas até seu lançamento. Os valores dos comprimentos dos pêndulos aqui apresentados referem-se aos comprimentos dos tubos fixos ao bocal de saída do funil. É considerado, portanto, como o valor a partir do final do bocal de saída e não representa, desse modo, o comprimento total da área de aceleração.

Figura 23 - Dimensões do funil e bocal de saída, em milímetros, onde ocorre a fixação dos pêndulos de diferentes comprimentos.

Para definição do material utilizado na construção do pêndulo, foi realizado um ensaio prévio com tubos de policloreto de vinila (PVC) para verificar se a resistência mecânica do material era suficiente para os ensaios de distribuição com calcário, uma vez que estes tubos são de baixo custo, fácil acesso, além de apresentar grande variabilidade de diâmetros e comprimentos no mercado. Após a confirmação, optou-se por utilizá-los.

O bocal de saída do funil para o pêndulo (**Figura 24**) foi fabricado de forma a ficar paralelo ao solo quando fixo à estrutura, e com 200 mm de diâmetro, valor determinado com base na relação entre diâmetro e vazão máxima obtida pelos modelos existentes e superdimensionando-o para a fixação de tubos de diâmetros padronizados. Um bocal de maior dimensão permite melhor escoamento do material para dentro do pêndulo, além de possibilitar que ensaios com diferentes diâmetros de pêndulos sejam realizados sem a necessidade de reconstruir toda estrutura metálica. A colocação de uma redução na saída do bocal permite a fixação de pêndulos de menores diâmetros de forma rápida e econômica. Diâmetros maiores não se mostraram aplicáveis, devido à maior massa e ao superdimensionamento já projetado.

Figura 24 - Funil com pêndulo, montado de maneira a deixar o pêndulo paralelo ao solo.

Fabricou-se também uma estrutura para fixar o novo mecanismo distribuidor logo abaixo do final da esteira transportadora (**Figura 25**), cujos objetivos foram direcionar o calcário proveniente do mecanismo dosador para o interior do pêndulo e ajudar na sustentação das peças responsáveis pela movimentação do mecanismo. Em todos os casos buscou-se fabricar soluções de simples construção e baixo custo.

Figura 25 - Estrutura para sustentação do mecanismo distribuidor.

Todos os ensaios foram realizados em condição estática e para o acionamento do mecanismo distribuidor pendular optou-se por um motor elétrico trifásico, 4 polos, 2 kW (WEG, Jaraguá do Sul, RS). A rotação é transmitida por uma transmissão de rodas denteadas e corrente, com roda denteada motora de 16 dentes e movida de 48 dentes, resultando em redução 3:1. Uma estrutura para a fixação do motor na máquina também foi construída de forma a alinhar a transmissão para o funcionamento do conjunto (**Figura 26**).

Figura 26 - Acionamento do conjunto: motor elétrico e transmissão de rodas denteadas e corrente.

A frequência de funcionamento do pêndulo foi uma das variáveis analisadas no estudo, e para isso realizaram-se ensaios com diferentes rotações no motor elétrico. Optou-se por um intervalo de rotações no volante de 52 a 156 rpm. O limite inferior foi determinado pela frequência de funcionamento na qual começou a existir fluxo de material no interior do pêndulo e o consequente lançamento das partículas. Já o valor superior foi determinado pela resistência mecânica da estrutura. Dentro dessa amplitude foram definidos outros cinco valores. Deve-se levar em consideração que cada rotação do volante representa dois movimentos no pêndulo (“ida e volta”).

O motor elétrico de 4 polos, com 1710 rpm nominais, fornecia 570 rpm no volante e para adequar o acionamento às rotações desejadas utilizou-se junto ao motor elétrico um inversor de frequência PWM (*Pulse Width Modulation*) A511 (Siemens, Munique, Alemanha) (**Figura 27**) que possui características que se adequavam às necessidades do projeto, como permitir uma aceleração gradativa e um ajuste fino da rotação, além de eliminar a necessidade de diversas reduções para atingir determinadas rotações.

Figura 27 - Inversor de frequência utilizado para controle de rotação do motor elétrico.

As diferentes rotações no volante foram mensuradas com um foto tacômetro DT-2244B (Minipa, São Paulo, Brasil), que possibilitou definir a relação entre a frequência no inversor e a equivalente frequência do pêndulo. As medições foram realizadas a cada 1 Hz no inversor de frequência, uma vez que o sistema é proporcional e sem escorregamento, não se mostrando necessária a medição da rotação para cada incremento de frequência (0,1 Hz).

A amplitude do movimento, determinada pela relação existente entre o diâmetro do volante e comprimento do garfo, não foi modificada cujo ângulo mensurado foi de 54° (**Figura 28**).

Figura 28 - Amplitude de movimento do pêndulo, mensurado para o protótipo desenvolvido.

Os ensaios foram realizados com calcário comercial (Diamante, Tiete, SP) (PRNT, PN, RE, CaO e MgO, respectivamente, 70%, 83%, 15%, 25% e 17%). A respeito da granulometria, o fabricante informa que o calcário utilizado nos ensaios passou 100% na peneira ABNT nº10 (2 mm), 93% na peneira ABNT nº 20 (0,84 mm), e 68% na peneira ABNT nº 50 (0,3 mm), portanto dentro dos padrões especificados pela norma brasileira. Para determinação da densidade foi utilizado um cilindro de área conhecida, preenchido com calcário e pesado em uma balança de precisão com sensibilidade de 0,01 g. A umidade do calcário, de 0,6 %, foi obtida por meio de uma amostra mantida por 24 h em estufa a 105 °C, determinando seu valor em base seca. O ângulo de repouso foi determinado através de um equipamento específico, que permite ler a dimensão dos dois catetos formados após a acomodação do material. As características físicas do calcário estão apresentadas na **Tabela 3**.

Tabela 3 - Características do calcário utilizado nos ensaios.

Nº Malha ABNT (mm)	Retido na peneira (%)
10 (2 mm)	0
20 (0,84 mm)	7
50 (0,3 mm)	32
Densidade (g cm ⁻³)	1,3849
Umidade (%)	0,62
Ângulo de repouso (°)	33,7

Após a montagem foram realizados testes funcionais, primeiramente sem produto e após alguns ajustes iniciaram-se os testes com aplicação de calcário (**Figura 29**) com diferentes pêndulos, apenas com a visualização do funcionamento do conjunto.

Figura 29 - Testes iniciais do conjunto para avaliar a capacidade do protótipo em lançar o calcário.

Os ensaios foram realizados no pátio do Laboratório de Agricultura de Precisão, Departamento de Engenharia de Biosistemas, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), localizado em Piracicaba, São Paulo. Buscou-se manter um padrão nas condições em que foram realizados, para isso todos os ensaios foram executados no mesmo local e optou-se por dias com pouco vento (inferior a 2 m s^{-1}) e baixa umidade. O calcário utilizado foi sempre proveniente do mesmo lote, a fim de evitar possíveis diferenças do material.

Realizou-se primeiramente o teste para verificar a capacidade de escoamento do material e definir valores iniciais de vazão. A vazão máxima foi mensurada na maior frequência ensaiada (5,2 Hz), uma vez que o fluxo de material no interior do pêndulo é influenciado por esse fator. O calcário foi fornecido ao mecanismo distribuidor de forma manual, com o intuito de manter o nível do reservatório (funil) constante durante o período de um minuto.

Posteriormente foram avaliadas as larguras máximas de lançamento. Devido ao grande número de ensaios e repetições, foi necessária a utilização de uma metodologia que permitisse a realização dos ensaios de maneira ágil e eficiente. Decidiu-se, então, que estas seriam determinadas através de aplicações realizadas em uma superfície plana, sobre uma lona, com vazão constante e em quantidade suficiente para permitir sua visualização. Ensaíram-se pêndulos de seção circular de 150 mm de diâmetro, com comprimentos de 300, 200 e 100 mm a uma distância de 350 mm do solo, em sete diferentes frequências de funcionamento: 1,73, 2,60, 3,47, 3,90, 4,33, 4,77 e 5,20 Hz. Com base no ensaio realizado por Bahaosean e Brouns (1998) os mesmos comprimentos de pêndulos também foram ensaiados, nas diferentes frequências, com uma rampa na extremidade (**Figura 30**), de modo a criar uma componente vertical da velocidade, para avaliar qual sua influência na distância de lançamento das partículas. Devido à pequena massa das partículas de calcário, uma inclinação elevada acabaria por se tornar um obstáculo e desacelerá-las, resultando em um efeito oposto ao desejado, além de aumentar consideravelmente a deriva de partículas. Desta forma, optou-se por uma inclinação de 30° , de forma a facilitar o fluxo do material. As rampas foram feitas com o mesmo material do pêndulo (PVC).

Figura 30 - Rampa (30°) fixada à extremidade do pêndulo.

Ensaaios prévios indicaram que o perfil da distribuição produzido pelos pêndulos de seção circular apresentavam sempre dois picos de acúmulo de material, e que embora exista uma deposição do material em uma largura pouco superior à considerada, concluiu-se que esse incremento na distância ocorre devido ao ricochete das

partículas ao tocar o solo, e não representa, portanto, a largura real de lançamento. Além disso, em uma aplicação em campo o ricochete seria reduzido devido à própria rugosidade do solo ou à presença da cultura. Diante da observação dos resultados dos ensaios prévios, a largura máxima de aplicação foi definida como a distância entre o final dos picos de acúmulo de material (**Figura 31**~~Erro! Fonte de referência não encontrada.~~), e tomou-se como padrão a mensuração da distância perpendicular ao deslocamento da máquina, que representa o valor real da largura durante seu deslocamento. Apesar desse método não apresentar alta resolução nos resultados é possível utilizá-lo a fim de comparação, já que foi utilizado em todos os ensaios.

A distância à qual a distribuidora é capaz de lançar o material no mesmo eixo de seu deslocamento teve menor importância neste trabalho, já que a distância de lançamento que efetivamente representa a largura de aplicação é aquela projetada no eixo perpendicular ao seu deslocamento. Diante disso, as distâncias de lançamento em relação ao eixo de deslocamento não foram coletadas.

Figura 31 - Representação da metodologia utilizada para mensurar a largura máxima de lançamento das partículas.

Foram realizadas três repetições para cada ensaio. A partir dos dados foi feita uma análise descritiva com os parâmetros média, desvio padrão e CV, para cada configuração, com o intuito de verificar se as leituras estão condizentes. Além da análise estatística básica, também foi realizada uma análise da variância dos dados a 5% de probabilidade. Para valores de $p > 0,05$ foi realizado um teste de comparação de médias múltipla (Tukey).

Outra etapa da pesquisa foi avaliar o padrão da distribuição produzido por diferentes configurações de pêndulos. Os ensaios foram realizados a 4,33 Hz sobre duas fileiras de coletores de 1000 x 250 x 150 mm, dispostos lado a lado, de modo a coletar todo o material lançado e permitir a maior resolução possível (**Figura 32**). A distância entre a parte superior do coletor e parte inferior do pêndulo foi de 200 mm. Posterior à distribuição, as quantidades presentes em cada linha foram coletadas e mensuradas em uma balança de precisão com sensibilidade de 0,01 g. Para a análise, os valores foram inseridos no software ADULANÇO 3.1, que forneceu o perfil de distribuição e o CV para diferentes situações de recobrimento.

Figura 32 – Exemplos dos ensaios para determinação do perfil da faixa de aplicação.

Os perfis de pêndulo ensaiados são apresentados na **Figura 33**. O formato com seção circular foi tomado como referência, uma vez que não sofreu nenhuma modificação. Tentou-se construir um defletor com base em um modelo convencional existente, porém sem sucesso. Os resultados obtidos com essa reconstrução não foram satisfatórios, apresentando pouca variação em relação ao modelo sem defletor. Procurou-se, então, buscar uma variável alternativa ao defletor, ou seja, uma configuração capaz de suavizar os picos de acúmulo de material. Para isso, criou-se uma configuração com a adição de um tubo de menor diâmetro em duas diferentes posições: no interior e no exterior do tubo. Buscou-se avaliar, também, a influência de uma maior dimensão em um dos eixos, mantendo a área constante, através do ensaio de um perfil elíptico.

Figura 33 - Formatos e dimensões, em milímetros, dos pêndulos ensaiados para avaliação do perfil de distribuição.

Ressalta-se que os ensaios para análise do perfil de distribuição também foram realizados de forma estática. Como os coletores são dispostos transversalmente ao sentido de deslocamento da máquina, é possível fazer essa avaliação e compará-los com a distribuidora em movimento. A **Figura 34** ilustra a semelhança existente entre os padrões de distribuição resultantes de um ensaio estático e dinâmico. Enfatiza-se que essa comparação somente é possível quando a velocidade de deslocamento da distribuidora for desprezível em relação à frequência do mecanismo distribuidor. Para verificar as diferenças existentes entre o protótipo criado e os modelos disponíveis no mercado, a vazão máxima e o perfil de distribuição foram comparados com os de uma distribuidora pendular convencional (Vicon PS200), ensaiada mantendo a mesma altura do pêndulo em relação ao solo utilizada nos ensaios anteriores.

Figura 34 - Comparação entre o perfil de distribuição produzido por uma distribuição estática (a) e cinemática (b).
Fonte: COETZEE & LOMBARD, 2011.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A **Tabela 4** apresenta a equivalência entre a frequência no inversor e movimentos do pêndulo. Não houve escorregamento no sistema, e cada incremento de 1 Hz no inversor resultou em um incremento de 0,43 Hz no pêndulo.

Tabela 4 - Relação entre frequência no inversor e frequência de funcionamento.

Frequência do inversor (Hz)	Movimentos do pêndulo (Hz)
4	1,73 (Hz)
6	2,60
8	3,47
9	3,90
10	4,33
11	4,77
12	5,20

Devido à maior massa do conjunto funil/pêndulo, atingir a frequência comumente utilizada nos distribuidores pendulares mostrou-se um desafio, e por isso a frequência máxima usada nos ensaios foi inferior às distribuidoras pendulares convencionais. O inconveniente existente nesse princípio de funcionamento é a elevada aceleração e desaceleração que acontece diversas vezes por segundo, diferentemente dos distribuidores centrífugos que aceleram os discos apenas no início de seu funcionamento e depois mantêm um movimento constante. O incremento da frequência nos distribuidores pendulares implica em um aumento na aceleração, desaceleração e, conseqüentemente, nas forças que agem sobre o conjunto, que variam com o quadrado da velocidade, ou seja, os esforços que atuam sobre o conjunto crescem exponencialmente com a frequência do pêndulo. Por conta disso a resistência mecânica do conjunto foi o fator que não possibilitou a utilização de maiores rotações no motor elétrico. Apesar de o protótipo trabalhar em frequências inferiores, verificou-se que as distâncias foram próximas às alcançadas pelos distribuidores pendulares convencionais. Dessa maneira enfatiza-se a dificuldade em aumentar a distância de lançamento de partículas de pequena massa. Nesses casos, a partir de determinado momento, o incremento em energia não resultará em maiores distâncias devido à incapacidade da partícula em absorver energia cinética.

A vazão máxima de calcário que o mecanismo distribuidor foi capaz de distribuir, a 5,2 Hz, foi de 6,5 kg s⁻¹, resultado inferior à capacidade máxima do mecanismo dosador, porém superior às encontradas nos modelos pendulares convencionais, de aproximadamente 1,5 kg s⁻¹ para o mesmo material. Considerando a vazão máxima e uma largura efetiva de 5 m, a distribuidora precisaria ter uma velocidade de 1,7 m s⁻¹ (6 km h⁻¹) para realizar uma aplicação à taxa de 8 ton ha⁻¹, velocidade aceitável para calagem, principalmente considerando que essa taxa raramente será utilizada em grandes áreas.

Assim como comentado por Mursec e Ploj (2002), foi observado que a vazão nesse tipo de distribuidor é influenciada pela sua frequência de funcionamento, o que não acontece nos distribuidores de princípio centrífugo por exemplo. Uma fabricação que possibilite maiores rotações permitirá, conseqüentemente, maiores vazões.

A partir de todos os resultados obtidos pela combinação de comprimentos, frequências e a utilização ou não da rampa, foi realizado uma análise de variância (apêndice A) dos dados e o teste de normalidade dos resíduos pelo método de Shapiro-Wilk, que apresentaram uma distribuição normal (apêndice B). A partir da indicação de que houve diferença significativa a um nível de 5% de probabilidade e que os dados apresentam distribuição gaussiana, prosseguiu-se com o teste de comparação de médias de Tukey.

A **Tabela 5** apresenta os valores da largura máxima de lançamento mensurados para pêndulos de 100 mm de comprimento para diferentes frequências, com e sem a adição da rampa em sua extremidade. A tabela apresenta também o valor médio, desvio padrão e CV das três repetições, para cada configuração. Os baixos valores de CV, obtidos de repetições nas três mensurações de distância, indicam que os resultados foram obtidos de forma precisa e que a metodologia utilizada foi capaz de manter um padrão nas medições, apresentando resultados consistentes, sem grandes variações entre as medições.

Observando os valores absolutos nota-se aumento da média das distâncias com o incremento da frequência e com a adição da rampa, resultados que se assemelham àqueles encontrados por Mursec e Ploj (2002) e Bahaoean e Brouns (1988), e que também seguem a tendência das equações propostas por Silva (1991).

Tabela 5 - Valores obtidos para pêndulos com 100 mm de comprimento, com e sem rampa na extremidade.

Sem rampa							Com rampa			
Comp. ^a (mm)	f ^b (Hz)	Repetição	Distância	Média	Desv. P. ^c	CV (%)	Distância	Média	Desv. P. ^c	CV (%)
			(m)				(m)			
100	1,73	1	1,89				2,12			
		2	1,93	1,89	0,04	2,12	2,10	2,11	0,01	0,55
		3	1,85				2,10			
	2,6	1	2,60				2,69			
		2	2,63	2,61	0,02	0,66	2,72	2,69	0,04	1,31
		3	2,60				2,65			
	3,47	1	2,79				3,20			
		2	2,82	2,78	0,05	1,85	3,22	3,20	0,02	0,63
		3	2,72				3,18			
	3,9	1	2,97				3,37			
		2	3,02	3,0	0,03	0,84	3,49	3,44	0,06	1,78
		3	3,00				3,45			
	4,33	1	3,22				3,57			
		2	3,17	3,21	0,04	1,26	3,62	3,61	0,04	1,12
		3	3,25				3,65			
	4,77	1	3,30				3,78			
		2	3,25	3,28	0,03	0,81	3,69	3,73	0,05	1,23
		3	3,29				3,72			
	5,2	1	3,55				4,03			
		2	3,56	3,57	0,03	0,74	3,95	3,97	0,05	1,33
		3	3,60				3,93			

Comp.^a: comprimento do pêndulo fixo ao bocal de saída, f^b: frequência do pêndulo, Desv. P.^c: desvio padrão, CV: coeficiente de variação.

A **Figura 35** **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os valores médios do alcance obtido para as diferentes frequências do pêndulo de 100 mm. Os resultados do teste Tukey a 5% de probabilidade indicaram que não apresentaram diferença significativa entre o alcance obtido entre as frequências de 4,33 e 4,77 Hz para ambas as configurações, assim como para a utilização da rampa a 2,60 Hz. Excetuando-se as frequências supracitadas, nota-

se que para o pêndulo de 100 mm de comprimento o incremento da frequência e a utilização da rampa resultou em ganhos na distância de lançamento.

Figura 35 - Comparação entre as distâncias obtidas para pêndulos de 100 mm de comprimento. Letras minúsculas comparam pêndulos de diferentes configurações em uma mesma frequência; letras maiúsculas comparam pêndulos sem rampa em diferentes frequências; negrito comparam pêndulos com rampa em diferentes frequências.

Assim como para o pêndulo de 100 mm, as medições para o pêndulo de 200 e 300 mm (**Tabela 6** e **Tabela 7**, respectivamente) também apresentaram baixos valores de CV, reafirmando que as medições seguiram um padrão capaz de assegurar pequenas variações entre as repetições.

A mesma tendência de se atingir maiores distâncias com o incremento da frequência e/ou com a adição da rampa ao se observar os valores absolutos também foi observada para esses comprimentos de pêndulos. A exceção para ambos aconteceu a 1,73 Hz, onde a adição da rampa produziu uma resposta oposta à esperada, apresentando uma redução na distância. Nessa frequência, devido à baixa velocidade de saída das partículas, a rampa se tornou um obstáculo que reduziu a velocidade de saída e consequentemente a distância de lançamento, fato que seria ainda mais acentuado com a utilização de maiores angulações para a rampa. O melhor desempenho do pêndulo de 100 mm nessa situação supostamente deve-se ao fato de, por estar mais próximo do bocal de saída, as partículas chegavam à rampa com maior velocidade, proporcionada pela aceleração durante o deslocamento pelo bocal de saída, construído com um declive.

Tabela 6 - Valores obtidos para pêndulos com 200 mm de comprimento, com e sem rampa na extremidade.

Comp. ^a (mm)	f ^b (Hz)	Repetição	Sem rampa				Com rampa			
			Distância	Média	Desv. P. ^c	CV (%)	Distância	Média	Desv. P. ^c	CV (%)
			(m)				(m)			
200	1,73	1	2,32			1,10	2,12			1,17
		2	2,27	2,23	0,03		2,15	2,15	0,03	
		3	2,30				2,17			
	2,60	1	3,07			3,14	3,07			1,30
		2	2,92	2,96	0,09		3,15	3,11	0,04	
		3	2,90				3,10			
	3,47	1	3,50			1,29	3,53			0,56
		2	3,53	3,54	0,05		3,55	3,55	0,02	
		3	3,59				3,57			
	3,90	1	3,69			2,22	3,75			2,04
		2	3,60	3,61	0,08		3,90	3,81	0,08	
		3	3,53				3,79			
	4,33	1	3,72			0,56	4,25			0,84
		2	3,76	3,74	0,02		4,32	4,29	0,04	
		3	3,75				4,30			
	4,77	1	4,05			0,62	4,65			0,57
		2	4,07	4,07	0,03		4,60	4,62	0,03	
		3	4,10				4,61			
	5,20	1	4,25			1,19	4,85			0,92
		2	4,32	4,31	0,05		4,94	4,90	0,05	
		3	4,35				4,90			

Comp.^a: comprimento do pêndulo fixo ao bocal de saída, f^b: frequência no pêndulo, Desv. P.^c: desvio padrão, CV: coeficiente de variação.

Tabela 7 - Valores obtidos para pêndulos com 300 mm de comprimento, com e sem rampa na extremidade.

Comp. ^a (mm)	f ^b (Hz)	Repetição	Sem rampa				Com rampa			
			Distância	Média	Desv. P. ^c	CV (%)	Distância	Média	Desv. P. ^c	CV (%)
			(m)				(m)			
300	1,73	1	2,50				2,40			
		2	2,52	2,49	0,03	1,22	2,40	2,39	0,02	0,72
		3	2,46				2,37			
	2,60	1	3,30				3,40			
		2	3,35	3,33	0,03	0,79	3,45	3,45	0,05	1,31
		3	3,34				3,49			
	3,47	1	3,96				4,00			
		2	4,02	4,01	0,05	1,14	4,05	4,05	0,05	1,23
		3	4,05				4,10			
	3,90	1	4,18				4,27			
		2	4,20	4,22	0,05	1,25	4,35	4,31	0,04	0,94
		3	4,28				4,30			
	4,33	1	4,78				4,85			
		2	4,73	4,77	0,04	0,75	4,94	4,95	0,1	2,02
		3	4,80				5,05			
	4,77	1	5,00				5,17			
		2	4,90	4,94	0,05	1,04	5,20	5,20	0,03	0,58
		3	4,93				5,23			
	5,20	1	5,25				5,77			
		2	5,17	5,25	7,50	1,43	5,70	5,69	0,09	1,50
		3	5,32				5,60			

Compr.^a: comprimento do pêndulo fixo ao bocal de saída, f^b: frequência no pêndulo, Desv. P.^c: desvio padrão, CV: coeficiente de variação.

Os resultados obtidos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade indicaram que não houve diferença significativa entre as distâncias obtidas pelo pêndulo de 200 cm sem rampa a 3,47 e 3,90 Hz (**Figura 36**), assim como para a utilização da rampa a 3,47 Hz para pêndulos de 200 mm e 300 mm de comprimento (**Figura 36, Figura 37**). Para ambos os comprimentos a adição da rampa a 1,73 Hz produziu uma redução significativa na distância de lançamento das partículas.

Observa-se que o pêndulo de 300 mm de comprimento foi o único que sempre apresentou diferença estatística entre as frequências, indicando que a frequência tem maior influência em maiores comprimentos.

Figura 36 - Comparação entre as distâncias obtidas para pêndulos de 200 mm de comprimento. Letras minúsculas comparam pêndulos de diferentes configurações em uma mesma frequência; letras maiúsculas comparam pêndulos sem rampa em diferentes frequências; letras em *itálico e negrito* comparam pêndulos com rampa em diferentes frequências.

Figura 37 - Comparação entre as distâncias obtidas para pêndulos de 300 mm de comprimento. Letras minúsculas comparam pêndulos de diferentes configurações em uma mesma frequência; letras maiúsculas comparam pêndulos sem rampa em diferentes frequências; letras em *itálico e negrito* comparam pêndulos com rampa em diferentes frequências.

As **Figura 35**, **Figura 36**, **Figura 37**, que relacionam frequência do pêndulo e distância para os diferentes comprimentos de pêndulos, fornecem informações que podem ser posteriormente utilizadas para a criação de uma tabela de regulagem da máquina. Por exemplo, através de qual configuração (comprimento, frequência e rampa) pode-se atingir determinada largura.

A **Figura 38** apresenta os resultados obtidos para os três diferentes comprimentos de pêndulos ensaiados, em suas duas configurações (com e sem rampa), nas sete frequências. Observa-se que a variação entre os valores máximos e mínimos obtidos em cada frequência aumentou com o incremento da frequência de funcionamento. Por exemplo, na frequência de 1,73 Hz a diferença entre a distância máxima (pêndulo de 300 mm sem rampa) e mínima (pêndulo de 100 mm sem rampa) foi de 60,3 cm, e para 5,2 Hz a diferença entre o pêndulo de 300 mm com rampa (máximo) e pêndulo de 100 mm sem rampa (mínimo) foi de 212 cm.

De acordo com a análise estatística, todos os resultados para as frequências de 4,33 Hz, 4,77 Hz e 5,20 Hz apresentaram diferença significativa a um nível de 5% de probabilidade. Além disso, o pêndulo de maior comprimento com rampa foi o que obteve os maiores valores de distância, seguido da sua configuração sem a rampa. Esses resultados indicam que a rampa teve a capacidade de aumentar a distância, porém sua resposta foi sempre inferior à adição de 100 mm de comprimento (Figura 38).

Em contrapartida, o pêndulo de 300 cm, em suas duas configurações de rampa, não apresentou diferença estatística nas frequências de 1,73 Hz, 3,47 Hz e 3,90 Hz avaliadas individualmente, porém isto não foi observado para a frequência de 2,60 Hz, na qual a configuração com rampa apresentou uma média estatisticamente superior à sem rampa (Figura 38).

A menor frequência ensaiada, 1,73 Hz, foi a que apresentou os resultados mais distintos quando comparado aos demais. Analisando de forma minuciosa esta frequência, observa-se que a utilização da rampa reduziu o alcance das partículas para os pêndulos de 200 mm e 300 mm. Além disso, esta frequência foi a única na qual dois comprimentos distintos não apresentaram diferença estatística entre si, como pode-se observar nos pêndulos de 300 mm com rampa e 200 mm sem rampa. Este comportamento atípico quando comparado às outras frequências estudadas pode ser explicado pela possibilidade da rampa se tornar um obstáculo, conforme mencionado anteriormente (Figura 38).

Figura 38 - Comparação entre as diferentes configurações de pêndulos para uma determinada frequência. Letras iguais não diferem estatisticamente a nível de 5% de significância.

Fazendo uma análise observando os valores absolutos, a redução de 25% e 50% na rotação máxima ensaiada produziu uma queda de largura de, respectivamente, 16%, 16,2% e 19,6%, e 26,9%, 31,2% e 39,5% para pêndulos de 100, 200 e 300 mm sem rampa, e de 13,4%, 22,1% e 24,3%, e 32,3%, 36,5% e 36,6% para pêndulos de 100, 200 e 300 mm com rampa. Ou seja, pêndulos de maiores comprimentos foram mais sensíveis à redução da frequência. Como comparação, no ensaio realizado por Mursec e Ploj (2002), também utilizando um distribuidor pendular porém com a aplicação de fertilizantes granulados e trabalhando com frequências superiores (540 rpm na TDP), relatou-se uma

redução de cerca de, respectivamente, 24% e 46% na largura de distribuição com uma redução de 23,6% e 49,3% na rotação da TDP. Apesar de se tratar de materiais e condições diferentes, nota-se uma semelhança entre as respostas.

Durante os ensaios de análise do perfil de distribuição foi observado que, devido à redução da altura de trabalho por conta da colocação dos coletores sob a máquina, a largura máxima atingida pelas partículas sofreu uma redução de cerca de 0,7 m.

O pêndulo circular de diâmetro 150 mm apresentou um padrão de distribuição com dois picos bem definidos (**Figura 39**), resultado que está de acordo com o que está descrito tanto na literatura (GADANHA JR e. al., 1991; HOFSTEE, 1995) quanto nos manuais dos fabricantes de distribuidoras pendulares, que afirmam que há uma distribuição com maiores quantidades de material nas extremidades da largura na ausência de um defletor, característica útil para fazer aplicações em duas faixas separadas. Notou-se também a simetria entre os lados, outra característica citada por Parish e Bergeron (1991), Coelho et al. (1992b) e Parish (1995a). Enfatiza-se que devido à frequência utilizada dos ensaios, de cerca de cinco movimentos por segundo, não foi possível garantir que ocorresse o mesmo número de movimentos para cada lado, e nem controlar em qual posição da amplitude o material começaria a ser distribuído. Portanto, parte da assimetria existente nos resultados apresentados pode ter sido ocasionada por esses fatores.

Figura 39 - Perfil de distribuição produzido pelo pêndulo circular de 150 mm de diâmetro.

O resultado das simulações de larguras de trabalho com os respectivos valores de CV gerado pelo software ADULANÇO 3.1 para o pêndulo de 150 mm de diâmetro é apresentado na **Figura 40**. Nota-se que, devido aos dois picos de acúmulo de material, o resultado encontrado para as larguras efetivas foi inferior as médias encontradas, de cerca de 5 m, para aplicações de calcário com distribuidoras pendulares em situações de campo. Os únicos valores com CV abaixo de 20% ocorreram a uma distância inferior a 0,75 m, o que evidencia que este tipo de perfil está mais adequado para fazer aplicações em faixas do que em área total, como já mencionado. Observa-se também que as curvas do percurso alternado esquerdo, alternado direito e contínuo estão praticamente sobrepostas, fato que acontece quando há um elevado grau de simetria na distribuição, ou seja, a simetria permite que diferentes percursos apresentem praticamente os mesmos CV.

A sobreposição entre as passadas realizadas pelo trator busca sempre homogeneizar a aplicação na área total da distribuição, dessa maneira, a região que recebeu menor quantidade do material será sobreposta pela região que distribui maior quantidade, buscando manter os valores das somatórias das quantidades o mais próximos possíveis. Via de regra, quanto mais homogêneo for o perfil da distribuição, menor a área que necessitará ser recoberta e,

possivelmente, maior a largura efetiva. Por conta disto, a largura efetiva de um perfil de distribuição que realiza aplicações concentradas nas laterais, apresentará sempre valores de largura efetiva inferiores àqueles apresentados por máquinas que distribuem o material de maneira mais homogênea.

Figura 40 – Valores de CV para diferentes larguras efetivas simuladas para o pêndulo circular de 150 mm de diâmetro.

A fixação de um tubo de menor diâmetro abaixo do tubo principal conseguiu produzir uma suavização no perfil, porém ainda distante de deixar a distribuição homogênea. As duas colunas simétricas que se destacaram no gráfico (**Figura 39**), que representam o material distribuído em uma área de dois coletores (50 cm^2), tiveram seus valores reduzidos e distribuídos em uma área maior (**Figura 41**). A região central da distribuição sofreu pouca influência, continuando a receber praticamente a mesma quantidade. Este fato pode ser explicado pela utilização do tubo de menor diâmetro onde parte do material, ao ser deslocado para seu interior, teve sua distância de lançamento reduzida devido às menores dimensões, lançando parte do material na região central. Porém a maior quantidade de material continuou a ser lançada na inversão de movimento do pêndulo. O centro, por ser a região de maior velocidade do pêndulo, manteve a característica de receber uma menor quantidade de material. A simetria entre os dois lados da deposição foi mantida.

Figura 41 - Perfil de distribuição produzido por um tubo circular de 150 mm com adição de um tubo de 50 mm na sua parte inferior.

O efeito dessa suavização no perfil de distribuição nas diversas situações de recobrimento é apresentada na **Figura 42**. Observa-se que mesmo com um perfil que apresenta pouca quantidade de material na região central, a diminuição da quantidade distribuída nos pontos de maior acúmulo resultou em CV sempre inferiores aos encontrados para o pêndulo circular, e inferiores a 20% até cerca de 1,3 m. O menor CV ocorreu a 1,25 m, com valores inferiores a 4% para todas as situações de percurso, o que indica que, nessa distância, devido a característica do perfil da distribuição, é possível realizar uma sobreposição capaz de homogeneizar a aplicação. A proximidade entre as curvas dos diferentes percursos indica, da mesma maneira, que existe um elevado grau de simetria no perfil de distribuição.

A pequena largura de trabalho encontrada para CV próximos a 20% indica que essa configuração, apesar de ter produzido uma pequena suavização no perfil, não foi capaz de homogeneizá-lo de modo a produzir larguras efetivas semelhantes às encontradas para a distribuição de calcário com distribuidoras pendulares.

Figura 42 - Valores de CV para diferentes larguras efetivas simuladas para o pêndulo circular de 150 mm de diâmetro e tubo de 50 mm na parte inferior.

A configuração com o tubo de 50 mm no interior do pêndulo (**Figura 43**) também foi capaz de reduzir os picos de deposição (**Figura 39**), distribuindo a grande quantidade de material que estava acumulada em uma pequena área, em uma área maior, de cerca de três coletores de largura ($0,75 \text{ m}^2$). Porém, da mesma maneira, apresentou resultados ainda distantes de representar uma distribuição homogênea, mantendo a característica de lançar uma menor quantidade de material na região central. Nota-se nessa configuração, entretanto, perda na simetria, devido supostamente a divisão e interrupção de parte do fluxo do material causada pelo tubo em seu interior. Apesar disso, não se verificou perda expressiva na distância de lançamento.

Figura 43 - Perfil de distribuição produzido por um tubo circular de 150 mm com adição de um tubo de 50 mm em seu interior.

Essas mudanças no perfil de distribuição resultaram em um pequeno incremento na largura efetiva, para cerca de 1,5 m para os diferentes tipos de trajetos, considerando um CV próximo a 20% (**Figura 44**). Da mesma maneira, não apresentou larguras efetivas com valores próximos aos encontrados para distribuidoras pendulares convencionais aplicando calcário. A perda da simetria visualizada no perfil da **Figura 43** é também observada no gráfico que relaciona o CV para diferentes situações de recobrimento (**Figura 44**), representada pela diferença entre as curvas. A maior diferença entre os CV comparando os trajetos acontece a 1,25 m, onde seus valores são de, respectivamente, 5,9%, 30% e 47,7% para os trajetos alternado esquerdo, contínuo e alternado direito, fato que indica, também, a influência que a simetria tem nos valores de CV para diferentes tipos de percursos.

Figura 44 - Valores de CV para diferentes larguras efetivas simuladas para o pêndulo circular de 150 mm de diâmetro e tubo de 50 mm no interior.

A utilização do formato elíptico apresentou características distintas. A elipse na posição de maior dimensão na vertical resultou em uma distribuição com elevada simetria, com dois picos de distribuição bem marcados e com uma quantidade de material muito superior às encontradas nos coletores próximos (**Figura 45 A**). Resultado diferente

do encontrado para a elipse com a maior dimensão na horizontal (**Figura 45 B**), que apresentou um perfil com baixa simetria, maior distância de lançamento, além da ausência de dois picos de deposição bem definidos, indicando uma quantidade de material muito superior às encontradas nas regiões próximas.

Figura 45 - Perfis de deposição produzidos pelo bocal de saída elíptico com maior dimensão na vertical (A), e maior dimensão na horizontal (B).

O comportamento das curvas do CV para diferentes situações de recobrimentos, assim como o perfil de distribuição, apresentaram resultados distintos. O perfil simétrico da distribuição produzido pelo pêndulo de bocal elíptico com a maior dimensão na vertical (**Figura 45 A**) apresentou, no gráfico de CV para diferentes situações de recobrimento (**Figura 46 A**), curvas dos diferentes tipos de percurso praticamente sobrepostas, o que não foi observado para o bocal elíptico com a maior dimensão na horizontal (**Figura 46 B**). Como anteriormente mencionado, a ausência dos picos de distribuição presentes na distribuição do perfil elíptico com a maior dimensão na horizontal resultou em curvas com menores CV, exceto para larguras efetivas próximas a 1 m.

Figura 46 - Valores de CV para diferentes larguras efetivas simuladas para o pêndulo elíptico de maior dimensão na vertical (A), e maior dimensão na horizontal (B).

Todos os pêndulos ensaiados não apresentaram as características adequadas para realizar aplicações em área total, devido principalmente aos perfis de distribuição por eles produzidos, que lançaram em sua totalidade uma maior quantidade de material nas extremidades das larguras. Essa situação, como já mencionado anteriormente, tem impacto negativo quando se leva em consideração a distância entre as passadas necessária para homogeneizar a área de aplicação.

A distribuidora pendular convencional ensaiada apresentou vazão máxima de $1,58 \text{ kg s}^{-1}$ de calcário, resultado próximo àquele fornecido pelo fabricante (de cerca de $1,5 \text{ kg s}^{-1}$) para o mesmo material. Por possuir o defletor na extremidade do pêndulo, apresentou perfil de distribuição (**Figura 47**) diferente daqueles produzidos pelo protótipo,

porém também com elevada simetria. Neste modelo a maior concentração de material foi na parte central da faixa de distribuição, fato que faz com que a largura efetiva, calculada com base na sobreposição, normalmente atinja maiores valores, uma vez que apenas as extremidades precisam ser sobrepostas, e não a região entre os picos de maior deposição.

Figura 47 - Perfil de distribuição produzido por uma distribuidora pendular Vicon PS200, com defletor na extremidade do pêndulo.

A largura efetiva, considerando um CV de 20%, foi de cerca de 4,5 m para todos os tipos de percursos (**Figura 48**). Deve-se considerar que a altura de trabalho foi inferior àquela normalmente utilizada, para poder comparar os valores, e por conta disso o resultado também foi inferior àquele fornecido pelos fabricantes, de cerca de 5 m para calcário em pó. A simetria visualizada na **Figura 47** também pode ser observada através da proximidade entre as curvas para os diferentes tipos de percursos.

Figura 48 - Valores de CV para diferentes larguras efetivas simuladas para a distribuidora pendular Vicon PS600.

Novos estudos que levem em consideração uma maneira de suavizar o perfil produzido por uma distribuidora pendular redimensionada para grandes vazões de calcário irão permitir que modelos semelhantes sejam utilizados para aplicações em área total, uma vez que a distância de lançamento por ele produzido atingiu um valor próximo ao encontrado para os modelos já existentes no mercado, aplicando o mesmo material. Assim como visualizado no perfil

de distribuição produzido pela distribuidora pendular convencional com o defletor na extremidade, os novos estudos devem avaliar se a utilização de um defletor, também redimensionado, teria a mesma capacidade de reduzir os picos de acúmulo de material, além de explorar outras alternativas com a mesma finalidade. Somente assim será possível a configuração de múltiplas unidades, lado a lado, em uma mesma distribuição transversal, já com a devida sobreposição.

Alternativamente, o protótipo mostrou-se apto a realizar distribuições em faixas laterais, com CV inferior a 3,14%, característica útil principalmente para culturas perenes. Atualmente grande parte desse tipo de aplicação é realizada por distribuidores centrífugos com a adaptação de anteparos, que direcionam o fluxo do material para as duas laterais. Além disso, o modelo mostrou ser capaz de regular a distância entre as faixas de aplicação de 1,89 m a até 5,69 m através da variação do comprimento do pêndulo, frequência e adição da rampa.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho buscou-se redimensionar um distribuidor de princípio pendular dedicados à fertilizantes para aplicação de grandes vazões de calcário em pó. O modelo construído foi capaz de distribuir uma vazão de 6,5 kg s⁻¹ de calcário a uma frequência do pêndulo de 5,2 Hz, vazão superior a encontrada para os distribuidores pendulares existentes atualmente, que é de cerca de 1,5 kg s⁻¹ para o mesmo material. Ressalta-se que nesse princípio de distribuição a frequência tem influência sobre o fluxo de material no interior do pêndulo, e a utilização de maiores rotações no volante permitiria, conseqüentemente, maiores vazões.

Em relação à largura máxima de lançamento foram obtidos valores de até 5,6 m, valores próximos aos encontrados nas distribuidoras pendulares convencionais para aplicações de calcário, o que permitiria aplicações da ordem de 8 ton ha⁻¹ a uma velocidade de 1,6 m s⁻¹ (6 km h⁻¹), valores aceitáveis para essa operação, principalmente quando considerado que essa taxa de aplicação raramente será utilizada em grandes áreas.

O estudo também revelou que a distância máxima na qual as partículas são lançadas é influenciada pelo comprimento do pêndulo, frequência de funcionamento e pela adição ou não de uma rampa na extremidade do pêndulo. Através da modificação destas variáveis, o protótipo mostrou-se capaz de realizar as distribuições em diferentes larguras (1,89 m a 5,69 m). Os resultados indicaram que, acima de 3,9 Hz, todas as configurações de pêndulos ensaiadas tiveram resultados que diferiram estatisticamente a 5% de probabilidade, e as maiores distâncias foram alcançadas pelos pêndulos de maiores comprimentos com a adição da rampa. Outro fato revelante foi a resposta da rampa na menor frequência ensaiada (1,73 Hz) que, diferentemente do resultado encontrado para as outras frequências, se tornou um obstáculo que reduziu a distância de lançamento.

Devido a ausência de um defletor ou de outra estrutura que tivesse a função de suavizar o perfil de distribuição, as deposições apresentaram maior quantidade de calcário distribuído nas extremidades da largura, lançados durante a inversão de movimento do pêndulo. Tal fato resultou em larguras efetivas abaixo das normalmente encontradas em distribuidoras pendulares convencionais, o que ainda deve ser estudado para viabilizar o uso de múltiplas unidades, lado a lado, em uma mesma distribuição transversal, já com a devida sobreposição. Alternativamente, o protótipo permite a aplicações em faixas laterais em culturas perenes, com elevada simetria e com a variação da largura de aplicação facilmente controlada pela variação da frequência e do comprimento do pêndulo.

REFERÊNCIAS

- ALCARDE, J. C. Corretivos da acidez do solo: Características e interpretações técnicas. 2 ed. São Paulo, **ANDA**, 1992. 22p.
- ALCARDE, J.C. Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas. São Paulo, **ANDA**, 2005, 24 p. (ANDA, Boletim técnico 6)
- ALCARDE, J.C. Produtos utilizados para a correção de acidez dos solos. **Informações agronômicas** N° 34, junho/1986, p. 5-9. Instituto Brasileiro de Potassa e Fosfato – POTAFÓS. Piracicaba, SP
- AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I. Alteração de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 36:695- 702, 2001.
- APHALE, A.; BOLANDER, N.; PARK, J.; SHAW, L.; SVEC, J.; WASSGREN, C. Granular fertiliser particle dynamics on and off a spinner spreader. **Biosystems Engineering**. 85, 319–329, 2003.
- ASABE Standarts, S341.5 **Procedure for Measuring Distribution Uniformity and Calibrating Granular Broadcast Spreaders**. St Joseph, Mich. ASABE, 2018.
- AZEVEDO, A. C.; KÄMPF, N.; BOHNEN, H. Alterações na dinâmica evolutiva de Latossolo Bruno pela calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 191-198, 1996.
- BALASTREIRE, L. A. **Máquinas Agrícolas**, São Paulo, Editora Manole, 1987, 397p.
- BALASTREIRE, L. A.; COELHO, J. L. D. **Aplicação mecanizada de fertilizantes e corretivos**. São Paulo: ANDA, 1992, 47 p.
- BERNACKI, H.; HAMAN, J.; KANAFOJSKI, C. **Agricultural machines, theory and construction**. Washington: USDA-NSF, 1972. v.1, 883 p.
- BRADY, N. C. **Natureza e propriedades do solo**. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. 878 p.
- BRAGA, F. A.; VALE, F. M.; MUNIZ, J. A. Movimentação de nutrientes no solo, crescimento e nutrição mineral do eucalipto, em função de doses de gesso e níveis de irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p. 69-77, 1995.
- CAIRES, E. F.; BANZATTO, D. A; FONSECA, A. F. Calagem na superfície em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 24: 161-169, 2000.
- CAIRES, E. F.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22: 27-34. 1998.
- CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F.; MENDES, J. CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23:315-327, 1999.
- CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J; PADILHA, J. M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28: 125-136, 2004.
- CAMPOS, H. de. **Estatística aplicada à experimentação com cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ, 1984. 292 p.
- CARVALHO, M.C.S.; RAIJ, B. van. Calcium sulphate, phosphogypsum and calcium carbonate in the amelioration of acid subsoils for root growth. **Plant Soil**, 192:37-48, 1997.
- CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C.; ALBUQUERQUE, J. A. Manejo da calagem e os componentes da acidez de Latossolo Bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28: 317-326, 2004.

- COELHO, J.L.D.; MOLIN, J.P.; GADANHA JUNIOR, C D. Avaliação do desempenho operacional de mecanismos dosadores na aplicação do fosfogesso. In: **Seminário sobre o uso de gesso na agricultura**, 2, 1992, Uberaba, MG. Anais. 1992a. p. 83-103.
- COELHO, J.L.D.; MOLIN, J.P.; GADANHA JUNIOR, C D; VASARHELYI, A. Avaliação do desempenho de máquinas aplicadoras a lança na distribuição de gesso agrícola. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 21, 1992, Santa Maria, RS. **Anais. SBEA/UFSM**, 1992b, v.4, p. 2058-2068.
- COETZEE, C. J.; LOMBARD, S.G. Discrete element method modelling of a centrifugal fertiliser spreader. **Biosystems Engineering**, 109. pp 308-325. 2011.
- COINTAULT, F.; SARRAZIN, F.; PAINDAVOINE, M. High resolution low cost imaging system for particle projection analysis: application to fertiliser centrifugal spreading. **Measurement Science and Technology**. 13, 1087–1093, 2002.
- COINTAULT, F.; VANGHEYTE, J. Photographic imaging systems to measure fertiliser granule velocity during spreading. **The International Fertiliser Society**, proceeding 555, 2005.
- DALLMEYER, A. U. **Desenvolvimento de um rotor cônico para distribuição de calcário seco**. 1985. 103 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1985.
- DIAS, L. E.; ALVAREZ, V. H.; COSTA, L. M.; NOVAIS, R. F. Dinâmica de algumas formas de enxofre em colunas de solo tratados com diferentes doses de fosforo e gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 18. p. 373-380, 1994.
- DINTWA, E.; TIJSKENS, E.; OLIESLAGERS, R. De BAERDEMAEKER, J.; RAMON, H. Calibration of a spinning disc spreader simulation model for accurate sitespecific fertiliser application. **Biosystems Engineering**, 88, 49–62, 2004.
- ERNANI, P. R. Alterações em algumas características químicas na camada arável do solo pela aplicação de gesso agrícola sobre a superfície de campos nativos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 10, p. 241-245, 1986.
- FAGERIA, N. K. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.36, n.11, p. 1419-1424, 2001.
- FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. **Manejo da acidez dos solos de cerrado e de várzea do Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa-CNPAP, 1999. 42 p. (Documentos, 92).
- FAGERIA, N. K.; GHEYI, H. R. **Efficient crop production**. Campina Grande: UFPB, 1999. 548 p.
- FERREIRA, R. de P.; MOREIRA, A.; RASSINI, J. B. **Toxidez de alumínio em culturas anuais**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006, 35 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 63).
- GADANHA JUNIOR, C. D.; MOLIN, J. P.; COELHO, J. L. D.; YANH, C. H.; TOMIMORI, S. M. A. W. **Máquinas e implementos agrícolas do Brasil**, Sao Paulo: Instituto de Pesquisas tecnológicas do Estado de São Paulo, 1991. 469p.
- GRIFFIS, C. L.; RITTER, D. W.; MATTHEUS, E. J. Simulation of rotary spreader distribution patterns. Transactions of the ASAE, 26(1), p. 33-37. 1983.
- GRIFT, T. E; HOFSTEE, J. W. Measurement of velocity and diameter of individual fertilizer particles by an optical method. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 66(3), 235-238, 1997
- HACHUY, L. **Desempenho de uma distribuidora a lança com dois tipos de produtos aplicados em diferentes posições de aletas nos discos**, 2008. 60 f. Dissertação (Mestrado) -Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2008.

- HOFSTEE, J. W. Handling and spreading of fertilizers: part 3, measurement of particle velocities and directions with ultrasonic transducers, theory, measurement system, and experimental arrangements. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 58(1), 1–16, 1994.
- HOFSTEE, J. W. Handling and spreading of fertilizers: Part 4, The reciprocating spout type fertilizer spreader. **Journal of Agricultural engineering Research**, 62: 9-24, 1995.
- INNS, F. M., REECE, A. R. The theory of centrifugal distributor. II: Motion on the disc, off-centre feed. **Journal of Agricultural Engineering Research**. 7, 345–353, 1962.
- ISO. International Standart. **Equipment for distributing fertilizer test methods** – Part 1: Full width fertilizer distributor. 5690/1. 1982. Geneve, International Standards Organization, 1982.
- KARPINSKI Jr, G. Influência do perfil da aleta nos parâmetros de lançamento de fertilizante em distribuidores centrífugos. **Dissertação** (mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, 81 p., 2015.
- LIEDEKERKE, P. Van.; TIJSKENS, E.; DINTWA, E.; RIOUAL, F.; VANGHEYTE, J.; RAMON, H. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader. **Powder technology**. v :190, 2008.
- LUZ, P. H. C. **Máquinas para aplicação de calcário**. Rio Claro: EMBRACAL, 1989. P. 1-51. (EMBRACAL. Boletim Técnico 1)
- LUZ, P. H. C. **Tecnologia de aplicação de corretivos e fertilizantes em soja**. Pirassununga, 2002, 30p.
- MAGNI, S. R. **Avaliação da qualidade da distribuição de calcário por distribuidor centrífugo e gravimétrico**. 2013, 40 p. Tese (Mestrado em Agricultura de Precisão) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.
- MALAVOLTA, E. **ABC da adubação**. 4ª ed. São Paulo, Agronômica Ceres, 1979, 256 p.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Ceres, 2006. 638p.
- MANNEL, R. M.; RECCE, A. R. The theory of the centrifugal distributor. III: Particle trajectories. **Journal of Agricultural Engineering Reserarch**, 7(3), p. 78-84. 1963.
- MARSH, B.H.; GROVE, J.H. Surface and subsurface soil acidity: soybean root response to sulfate-bearing spent lime. **Soil Science Society of America Journal**. 56:1837-1842, 1992.
- MASCARENHAS, H. A. A.; GALLO, J. R.; RAIJ, B. van; IGUE, T.; BATAGLIA, O. C. **Efeitos da calagem nas características químicas do solo e na nutrição de soja em Latossolo Roxo distrófico**. *Bragantia*, 35:273-278, 1976.
- MELLO, F.A.F.; BRASIL SOBRINHO, M.O.C.; ARZOLLA, S.; SILVEIRA, R.I.; COBRA NETTO, A.; KIEHL, J.C. **Fertilidade do solo**. São Paulo, Nobel, 1983. 400p.
- MIALHE, L. G. **Máquinas Agrícolas: Ensaios & Certificação**. Piracicaba, São Paulo: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1996. 722 p.
- MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura**. Vol. II. São Paulo. EDUSP, 1980, 337 p.
- MIELNICZUK, J. Economicidade da calagem. In: Reunião brasileira de fertilidade, 15, Campinas, SP, 1983. **Acidez e calagem no Brasil**. Campinas, SBSC/IAC, p. 63-77, 1983.
- MIRANDA, L. N.; MIRANDA, J. C. C. de. Efeito residual do calcário na produção de milho e soja em solo Glei Pouco Húmico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 1, p. 209-215, 2000.
- MOLIN, J. P.; COELHO, J. L. D.; VASARHELYI, A. Programa computacional para análise de distribuição transversal em aplicadores de fertilizantes e corretivos a lança. In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 21, Simpósio de Engenharia Agrícola do Cone Sul, 1, Santa Maria, 1992. **Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, Santa Maria: SBEA, 1992.

- MOLIN, J. P.; MACHADO, T. M.; MAGALHAES, R. P.; FAULIN, G. D. C. Segregação de fertilizantes aplicados a lanço. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, p. 614-622, 2009.
- MOLIN, J. P.; RUIZ, E. R. S. Validação de métodos simplificados de determinação da largura efetiva para distribuidores de fertilizantes e corretivos a lanço. In: XXVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 28, 1999, Pelotas. **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, Pelotas: SBEA, Cdrom, 1999.
- MOLIN, J.P.; MAZZOTTI, H.C. Influência da utilização e do tipo de amortecedores de ricochete em ensaios de aplicadores a lanço. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.2, p. 281-285, 2000.
- MOREIRA, S. G.; KIEHL, J. C.; PROCHNOW, L. I.; PAULETTI, V. Calagem em Sistema de semeadura direta e efeitos sobre a acidez do solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade do milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25: 71-78, 2001.
- MURSEC, B.; PLOJ, T. **Impact of various rpm levels on rotary and pendulum spreaders performance**. Agricultura, Maribor, p. 34-39, 2002.
- NOGUEIRA; N, O. Utilização de resíduos industriais como corretivo de acidez do solo e fonte de nutrientes para o cafeeiro, 2014, **Tese** (Doutorado em produção vegetal). Universidade Federal do Espírito Santo, ES, 2014.
- NOLLA, A; ANGHINONI, I. Métodos utilizados para correção da acidez no solo no Brasil. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v.6, p. 97-111, 2004
- OATES, K.M.; CALDWELL, A.G. Use of by-product gypsum to alleviate soil acidity. **Soil Science Society America Journal**, 49:915-918, 1985.
- OLIESLAGERS, R., RAMON, H., De BAERDEMAEKER, J. Calculation of fertiliser distribution patterns from a spinning disc spreader by means of a simulation model. **Journal of Agricultural Engineering Research**. 63, 137-152, 1996.
- ORTIZ-CAÑAVATE, J. **Técnica de la mecanización agraria: tractores y aperos de labranza y de cultivo**. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, 1985. 324p.: il. Livro.
- ORTIZ-CAÑAVATE, J.; HERNÁNZ, J.L. **Técnica de la mecanización agraria**. Madrid: Mundi-Prensa, 1989. 654p.
- ORTIZ-CAÑAVATE. Las máquinas agrícolas y su aplicación. 6 ed. Madrid, Espanha. Ediciones Mundo-Prensa, 2003.
- PARISH, R. L.; BERGERON, P. E. Field and laboratory study of a pendulum-action spreader. **Applied Engineering in Agriculture** 7: 163-167. 1991.
- PARISH, R. L.; CHANEY, P. P. Pattern sensitivity to location of fertilizer drop point on a rotary spreader impeller. **Transactions of the ASAE** 29(2):37 4-377, 1986.
- PARISH, R. L. Estimating effective swath width with a pendulum spreader. **Applied Engineering in Agriculture** 11: 507-509. 1995b.
- PARISH, R.L. Pattern skewing with a pendulum spreader. St Joseph: **Transactions of the ASAE**, 1995a. 6p. (ASAE PAPER 951303).
- PARISH, R.L. The effect of speed on performance of a rotary spreader for turf. **Applied Engineering in Agriculture** 3(1): 17- 19, 1987.
- PATTERSON, D. E., REECE, A. R. The theory of the centrifugal distributor. I: Motion on the disc, near-centre feed. **Journal of Agricultural Engineering Research**. 7, 232-240, 1962.
- PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T; PRATT, P. F. Toxicity of aluminum to coffee in Ultisols and Oxisols amended with CaCO₃ and CaSO₄. **Soil Science Society of America Journal**. 46:1201-1207, 1982.

- PELOIA, P. R.; MILAN, M. Proposta de um sistema de medição de desempenho aplicado à mecanização agrícola. **Revista Engenharia Agrícola**, 30, p. 681, 2010.
- PETRETE, C. & ANGHINONI, I. Alteração de atributos químicos no perfil do solo pela calagem superficial em campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25: 885-895, 2001.
- PIMENTEL, F. G. **Curso de estatística experimental**. 12 ed. Piracicaba: Livaria Nobel, 1987. 467 p.
- PITT, R. E.; FARMER, G. S.; WALKER, L. P. Approximating equations for rotary distributor spread patterns. **Transactions of ASAE**, 25(6): 1544-1552, 1982.
- POTTKER, D.; BEN, J. R. Calagem para uma rotação de culturas no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p. 75-684, 1998.
- PRIMAVESI, A. C. **Características de corretivos agrícolas**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2004.
- QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2000.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 420 p, 2011.
- RAMOS, L. A., NOLLA, A., KONRNDÖRFER, G. H., PEREIRA, H. S., CAMARGO, M. D. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30(5), 849-857, 2006.
- RHEINHEIMER, D.S.; SANTOS, E.J.S.; KAMINSKI, J.; BORTOLUZZI, E.E. & GATIBONI, L.C. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 24:795-805, 2000.
- RITCHEY, K. D.; SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E.; CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in Brazilian savannah oxisol. **Agronomy Journal**, v. 72, p. 40-44, 1980.
- RITCHEY, K. D.; SILVA, S. E; COSTA, V.F. Calcium deficiency in clayey B horizons of savannah Oxisols. **Soil Science**. 133:378- 382, 1982.
- SANCHEZ, P. A.; SALINAS, J. G. **Suelos acidos: estrategias para su manejo con bajos insumos en America Tropical**. Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 1983. 93p.
- SILVA, A. A.; VALE, F. R.; FERNANDES, L. A.; FURTINI-NETO, A. E.; MUNIZ, J. A. Efeitos de relações de $\text{CaSO}_4/\text{CaCO}_3$ na mobilidade de nutrientes no solo e no crescimento do algodoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 22, p. 451-457, 1998.
- SILVA, E. N. **Projeto preliminar de um disco centrífugo para distribuição de uréia**. 2011. 116 p. Dissertação (mestrado em engenharia agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2011.
- SILVA, N. F.; **Desenvolvimento e comprovação de um modelo matemático para simulação de desempenho de um distribuidor de fertilizantes de tubo oscilante**. 76p. Dissertação (Mestrado) – Esalq, Universidade de São Paulo. 1991.
- SILVEIRA, P. M.; ZIMMERMANN, F. J. P.; SILVA, S. C. da; CUNHA, A. A. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um latossolo submetido a diferentes sistema de preparo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 10, p. 2057-2064, out. 2000.
- SIQUEIRA, O. J. F. de. Resposta das culturas à calagem e a fósforo em solos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina e seus reflexos técnico-econômicos. In: SEMINÁRIO SOBRE CORRETI VOS DA ACIDEZ DO SOLO, 2., 1989, Santa Maria. **Anais**. Santa Maria: UFSM - Centro de Ciências Rurais - Departamento de Solos, p.151-176, 1989.
- SMITH, D. W.; SIMS, B. G.; O'NEILL, D. H. **Testing and evaluation of agricultural machinery and equipment**. Rome: FAO, 1994. 272 p.

- SOUZA, D. M. G. de; LOBATO, E.; REIN, T. A. **Uso de gesso agrícola nos solos dos cerrados**. Planaltina, DF. Embrapa Cerrados, 2005. (EMBRAPA-CPAC. Circular Técnica, 32).
- SUMNER, M.E.; SHAHANDEH, H.; BOUTON, J. ; HAMMEL, J. Amelioration of an acid soil prolife through deep liming an surface application of gypsum. **Soil Science Society America Journal**, 50:1254-1278, 1986.
- TIJSKENS, B.; VAN LIEDEKERKE, P.; RAMONS, H. **Modelling to Aid Assessment of Fertiliser Handling and Spreading Characteristics**. International Fertiliser Society; Colchester, UK: 2005.
- VAN LIEDEKERKE, P.; TIJSKENS, E.; DINTWA, E.; ANTHONIS, J.; RAMON, H. A discrete element model for simulation of spinning disc fertiliser spreader I. Single particle simulations. **Powder Technology**, 170. p. 71-75, 2006.
- VAN LIEDEKERKE, P.; TIJSKENS, E.; DINTWA, E; RIOUAL, F.; VANGHEYTE, J.; RAMON, H. DEM simulations of particle flow on a centrifugal fertilizer spreader. **Powder technology**, 190. p. 348-360, 2009.
- VAN LIEDEKERKE, P.; TIJSKENS, E.; RAMONS, H. DEM modeling of centrifugal fertilizer spreading; **Proceedings of the First International Symposium on Centrifugal Fertiliser Spreading**; Leuven, Belgium. 15–16 September 2005; pp. 25–32.
- VANGHEYTE, J.; VAN LIEDEKERKE, P.; SONCK, B. Development of a low cost method for measuring speed and direction of fertiliser grains to predict spread pattern from a centrifugal spreader. In: **Proceedings of the European Conference on Precision Agriculture**, p. 415–422, 2007.
- VARGAS, J. Formas de aplicação e tipos de corretivos da acidez do solo: alterações nos atributos em profundidade em longo prazo. **Dissertação** (mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, RS, 63 p, 2017.
- VELOSO, C. A. C.; BORGES, A. L.; MUNIZ, A. S.; VEIGAS, I. A. de J.M. Efeito de diferentes materiais no pH do solo. **Scientia Agricola**. v. 49, p. 123-128, 1992.
- VITTI, G. C.; PRIORI, J. C. Calcário e gesso: os corretivos essenciais ao plantio direto. **Revista Visão Agrícola**, n. 9, jul./dez., p. 30-34, 2009.
- VITTI, G. C.; LUZ, P. H. de C. **Utilização agrônômica de corretivos agrícolas**. Piracicaba: FEALQ/ GAPE, 2001.
- WEISS, A. **Desenvolvimento de um distribuidor helicoidal para calcário seco**. 1986. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 1986.
- YULE, I. J.; CROOKS, E. **Precision Farming: the price of imperfection**. Landwards, Spring. 1996. p. 5-9.

APÊNDICES

APÊNDICE A. Quadro da análise de variância (ANOVA) dos fatores comprimento, frequência e rampa e suas interações para a distribuição de calcário.

Fatores	GL	SQ	QM	F	F calculado	
Comprimento (c)	2	273047	136523	6018,876	<	2,20E-16 *
Frequência (f)	6	723211	120535	5314,007	<	2,20E-16 *
Rampa (r)	1	20191	20191	890,142	<	2,20E-16 *
Interação: c x f	12	38314	3193	140,762	<	2,20E-16 *
Interação c x r	2	2117	1059	46,671	<	2,34E-14 *
Interação: f x r	6	8628	1438	63,395	<	2,20E-16 *
Interação: c x f x r	12	3667	306	13,470	<	5,377E-16 *
Resíduos	84	1905	23			

GL: graus de liberdade, SQ: soma dos quadrados, QM: quadrado médio

* 0,05 de probabilidade

APÊNDICE B. Histograma de todas as distâncias obtidas para as diferentes configurações de pêndulos, nas diferentes frequências estudadas, para distribuição de calcário produzida pela distribuidora pendular estudada.