

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE**  
**FABRICAÇÃO - MESTRADO PROFISSIONAL**

**Glademir Karpinski Júnior**

**INFLUÊNCIA DO PERFIL DE ALETA NOS PARÂMETROS DE**  
**LANÇAMENTO DE FERTILIZANTE EM DISTRIBUIDORES CENTRÍFUGOS**

Passo Fundo

2015

**Glademir Karpinski Júnior**

**INFLUÊNCIA DO PERFIL DA ALETA NOS PARÂMETROS DE  
LANÇAMENTO DE FERTILIZANTE EM DISTRIBUIDORES CENTRÍFUGOS**

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Portella

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo

2015

Glademir Karpinski Júnior

**INFLUÊNCIA DO PERFIL DA ALETA NOS PARÂMETROS DE  
LANÇAMENTO DE FERTILIZANTE EM DISTRIBUIDORES CENTRÍFUGOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 15 de julho de 2015

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor José Antônio Portella  
Orientador

Professor Doutor Nilson Luiz Maziero  
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Walter Boller  
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Arno Udo Dallmeyer  
Universidade Federal de Santa Maria

*Dedico este trabalho a minha noiva, minha rocha, Luana.*

## **AGRADECIMENTOS**

À empresa MEPEL pela oportunidade e apoio financeiro. Ao meu orientador pelos conselhos, amizade e exemplo profissional. À minha noiva, pelas intermináveis correções. A todos aqueles que, de uma forma ou outra, despenderam seu tempo e conhecimento para que este estudo se tornasse realidade.

*“Life isn’t about finding yourself. Life is about creating yourself.”*  
*Anônimo*

*“Pain or damage don’t end the world. Or despair or beatings.  
The world ends when you’re dead. Until then, you got more punishment in store.  
Stand it like a man... and give some back”*  
*Al Swearengen*

## RESUMO

Distribuidores rotativos centrífugos, providos de discos e aletas, são os equipamentos mais utilizados para o lançamento de fertilizantes e corretivos, pois são máquinas de alto rendimento operacional. Suas particularidades no processo de aplicação e as indeterminações dos meios granulares tornam o sistema de lançamento o ponto mais complexo da máquina. Isto se traduziu em décadas de modelos e estudos sobre os parâmetros de distribuição, descrição do movimento das partículas no equipamento e fora dele, como afetam a deposição do material. Apesar do esforço científico dispendido, poucos trabalhos experimentais foram voltados para o efeito das palhetas e seus diversos perfis transversais nas características de lançamento de fertilizante. Utilizando conceitos de mecânica granular básica e um histórico de estudos aplicados em sistemas de distribuição, foi realizada a verificação da dependência das forças de resistência relativa à geometria do perfil transversal de palheta, capaz de alterar significativamente as propriedades de saída das partículas do sistema de discos. Dois tratamentos, perfil transversal de palheta e velocidade de rotação, foram levantados para a realização de um experimento em ambiente controlado, apto a medir o ângulo de lançamento dos grãos. Três perfis transversais: L, C e V e duas rotações foram utilizadas. O procedimento de coleta de dados envolveu um equipamento fotográfico para longas exposições que registrou a trajetória das partículas. Cada ensaio ocorreu em triplicata resultando em dezoito fotografias elencadas de um grupo de 54 exposições, totalizando 861 trajetórias e ângulos identificados. Os dados foram submetidos a análises de variância que detectaram diferenças significativas entre o perfil V e ambos L e C, exibindo valores menores para a forma em V. Uma investigação do coeficiente de variação entre todas as geometrias apontou uma grande redução de ambas V e C se comparadas a L. As menores grandezas do formato mais fechado, combinadas com uma análise da modelagem matemática levaram à conclusão que as forças de resistência são função do perfil geométrico transversal. Enquanto isso, os coeficientes de variação apontam que a contenção das partículas é mais importante para a uniformidade do que a imposição de forças de resistência.

Palavras-chave: Parâmetros de distribuição de fertilizantes. Perfis. Particulado.

## **ABSTRACT**

Centrifugal spinner spreaders are one of the most used machinery for agricultural fertilizer and corrective powder distribution, mainly because of its high performance operation. Granular media indetermination and distribution process characteristics molded the throwing system the most complex device on the equipment. It propelled several decades of modelling and through studies about distribution parameters, grain movement on and off the machine and how it affects the material deposition on the ground. Despite the scientific effort, few experimental researches were conducted of the vane profile effect on fertilizer distribution. Resorting to basic granular mechanics and several applied studies on distribution systems the dependence of the resistance forces on transversal vane geometry capable of altering exit properties was examined. Two variables were chosen to perform an experiment in a controlled environment able to measure grain exit angle, three profiles: L, C and V and two rotational speeds. Data was collected on long photographic exposures that embedded particle trajectories on the pictures. The tests provided 54 exposures, these 18 were analyzed resulting in 861 trajectories and angles identified. Data was submitted to variance analysis that detected significant differences between V and both L and C shapes, showing smaller values for V profile. An examination of the coefficient of variation of all the geometries pointed to a major reduction of both V and C if compared to L shape. Smaller quantities of the closed V form combined with an analysis of the mathematical modelling led to the conclusion that resistance forces are function of the transversal geometrical profile. Meanwhile, the coefficient of variation pointed out that particle restraint is more valuable to uniformity than the imposing of resistance forces.

**Keywords:** Fertilizer distribution parameters. Particulate. Vane profiles.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distribuidor de fertilizante e corretivo de largura fixa por gravidade (a) MEPEL DC 1500; (b) detalhe dos mecanismos internos.....	19
Figura 2 – Mecanismos distribuidores em distribuidoras em linhas individuais: a) em profundidade; b) na superfície.....	20
Figura 3 – Semeadoras e distribuidoras de fertilizante de largura fixa em linha: (a) Stara Victória TOP 4950 mostrando detalhe do distribuidor e reservatório de fertilizantes; (b) Semeato TDNG 520, .....	20
Figura 4 – Distribuidor de fertilizante e corretivo de largura fixa por sistema pneumático: (a) esquema dos principais componentes do equipamento; (b) distribuidor pneumático Rauch AGT 6036.....	21
Figura 5 – Distribuidor de fertilizante e corretivo de largura variável por sistema centrífugo de disco Valtra Fertilizer BDF 1300 M.....	22
Figura 6 - Exemplos de perfis de distribuição: M, W e regular. ....	23
Figura 7 – Distribuidor de fertilizante e corretivo de largura variável por sistema pendular Land Pride PFS4000.....	24
Figura 8 – Padrão de distribuição transversal e coeficiente de variação. ....	24
Figura 9 - Mecanismo dosador gravimétrico.....	25
Figura 10 - Dosador de fundo móvel rotativo. ....	26
Figura 11 - Dosador de esteira em um distribuidor centrífugo.....	26
Figura 12 - Dispositivo de dosagem de rosca-sem-fim com duas saídas.....	27
Figura 13 - Dosador de rodas dentadas com duas saídas. ....	27
Figura 14 – Mecanismo dosador de um distribuidor tipo queda-livre com orifícios duplos MEPEL DC 1500. ....	28
Figura 15 - Exemplos de difusores usados em aplicadores de queda-livre: (a) barras; (b) separadores; (c) grade difusora; (d) aletas separadoras.....	29
Figura 16 - Aplicadora pneumática esquematizada. Os tubos e os dispersores retangulares nas pontas são o sistema distribuidor.....	29
Figura 17 - Aplicadora pendular de tubo oscilante.....	30

Figura 18 –Distribuidor centrífugo de um disco Stara Tornado 600 MD. ....	31
Figura 19 –Distribuidor centrífugo de dois discos Kuhn Axis 50.1.....	31
Figura 20 – Influência da velocidade de lançamento horizontal e do coeficiente de resistência aerodinâmica na trajetória da partícula. (1) $K = 0,250$ ; (2) $K = 0,150$ ; (3) $K = 0,100$ , (4) $K = 0,075$ ; (5) $K = 0,050$ ; (6) $K = 0,025$ . ....	32
Figura 21 – Trajetória da partícula em um disco cônico. ....	32
Figura 22 – Configuração de duas palhetas para baixa vazão mássica do equipamento Stara Hércules 7000/10000.....	33
Figura 23 – Configuração de seis palhetas para alta vazão mássica do equipamento Stara Hércules 7000/10000.....	33
Figura 24 – Perfis longitudinais de palhetas.....	35
Figura 25 - Forças de reação em dois perfis transversais de palhetas, C e V.....	36
Figura 26 - Imagem em alta velocidade de fertilizante sendo ejetado de um disco plano com palheta em perfil C. ....	37
Figura 27 – Padrões de distribuição estacionários obtidos via experimental e DEM para diferentes posições de descarga no disco em relação ao seu centro, com a mesma rotação, vazão mássica e ângulo de palheta. ....	38
Figura 28 – Simulação do padrão de distribuição para a variação da posição do orifício de descarga em relação a uma posição angular radial arbitrária ( $\varphi_0$ ). ....	39
Figura 29 – Vista superior de um disco em rotação e os componentes da velocidade de lançamento das partículas, identificando os ângulos e componentes necessários para a modelagem do fenômeno. ....	46
Figura 30 – Imagem com movimento borrado mostrando o ângulo de ejeção aparente.....	47
Figura 31 - Distribuição espacial de massa para duas classes de partículas. Grãos menores ficaram mais próximos enquanto grãos maiores foram lançados mais longe. ....	51
Figura 32 – Perfil transversal de palheta L, C e V. ....	52
Figura 33 – Arranjo experimental para obtenção de imagens de movimento borrado.....	55
Figura 34 - Aparato experimental projetado para o estudo. ....	55
Figura 35 – Sistemas que compõem o aparato experimental. (1) reservatório com dosador e estrutura de suporte. (2) motor com inversor e conjunto do disco e (3) cavalete com o sistema de imagem e iluminação.....	56

Figura 36 - Detalhamento dos componentes do (a) sistema: (a1) reservatório, (a2) dosador, (a3) direcionador e (a4) estrutura. No (b) sistema 2: (b1) palhetas e disco, (b2) motor e inversor, (b3) estrutura de suporte. No (c) sistema 3: (c1) câmera e cabeça de tripé, (c2) estrutura, (c3) holofotes e posicionamento ajustável. ....	57
Figura 37 - Detalhes do conjunto obturador para controle da vazão mássica. (1) placa obturadora, (2) parafuso de fixação, (3 e 4) placas de suporte. ....	58
Figura 38 - Controles de posição do local de deposição no disco. (1 e 2) canais de posicionamento longitudinal. (3) canal de posicionamento de profundidade. ....	59
Figura 39 - Grãos de carbonato de cálcio granular (a) em uma pilha e (b) em detalhes. ....	59
Figura 40 - Tamanho de grão por passagem por peneira em ensaio de granulometria. ....	60
Figura 41 - Grãos de carbonato de cálcio granular para peneira de (a) 2 mm em uma pilha e (b) em detalhes, (c) 1 mm em uma pilha e (d) em detalhes, (e) 0,5 mm em uma pilha e (f) em detalhes. ....	61
Figura 42 - Exposição fotográfica de movimento borrado com valores invertidos para auxiliar a visualização. Estão destacadas as principais componentes da fotografia: o disco, a palheta, a trajetória da partícula e os ricochetes. ....	62
Figura 43- Ângulo de saída ( $\theta_{out}$ ) representado pelas barras com barras de erro de 2 desvios padrões, 95% da curva normal, relacionados com a velocidade de ejeção ( $v_h$ ) para cada palheta segundo seu valor médio de rotação. ....	65
Figura 44 - Ângulo médio de saída ( $\theta_{out}$ ) relacionados com o coeficiente de variação (CV) para cada palheta. ....	66
Figura 45 - Forças esquematizadas agindo numa partícula em um rotor plano com palhetas retas. ....	67
Figura 45 - Vista de uma partícula interagindo com um perfil L ( <i>esquerda acima</i> ), C ( <i>direita acima</i> ) e V ( <i>abaixo</i> ), mostrando as forças normais $F_{n1}$ , $F_{n2}$ e $F_{n3}$ que causam as forças de fricção se desenvolvendo de $t_0$ a $t_2$ . ....	68
Figura 46 - Fotografia exibindo as partículas (a) ascendendo na palheta durante sua saída do disco e (b) expelindo pó após o impacto final com a palheta. ....	69
Figura 47 - Ângulo de saída ( $\theta_{out}$ ) representado pelas barras com barras de erro de 2 desvios padrões relacionados com a velocidade de ejeção ( $v_h$ ) para cada combinação de aleta e rotação. ....	71

Figura 48 - Comparativo gráfico da velocidade de saída entre os dados da literatura especializada e os resultados do experimento. Os últimos três valores estão repetidos para facilitar o confronto entre as velocidades. .... 73

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Detalhamento dos fatores envolvidos no experimento.....	53
Tabela 2 - Análise descritiva do ângulo de saída médio. ....	63
Tabela 3 - Resumo da aplicação da ANOVA para os dados gerais. ....	63
Tabela 4 - Resultados da análise de variância para as três palhetas ensaiadas em relação ao seu ângulo de saída médio. ....	64
Tabela 5 - Constantes aplicadas durante o experimento.....	65
Tabela 6 - Resultados da análise de variância do ângulo de saída para os tratamentos de rotação e vazão mássica.....	69
Tabela 7 - Análise descritiva do ângulo de saída médio em relação as três palhetas ensaiadas. ....	69
Tabela 8 - Resumo da aplicação da ANOVA para o ângulo de saída na interação entre os perfis transversais de palheta e a rotação/vazão mássica. ....	70
Tabela 9 - Resultados da análise de variância para as interações entre os perfis transversais de palheta e a rotação/vazão mássica em relação ao ângulo de lançamento.....	70
Tabela 10 - Resumo dos dados da literatura especializada em contraste com os resultados do experimento. ....	72

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANOVA	Analysis of Variance
ASABE	American Society of Agricultural and Biological Engineers
CR2	Canon RAW version 2
CV	Coefficiente de Variação
DEM	Discrete Element Method
DSLR	Digital Single Lens Reflex Camera
EFC	Equivalent Friction Coefficient
ISO	International Organization for Standardization
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LED	Light Emitting Diode

## LISTA DE SÍMBOLOS

$F$	Força de inércia	N
$f_1; f_2$	Força de reação de fricção 1 e 2	N
$F_c$	Força centrífuga	N
$F_{cor}$	Força de Coriolis	N
$F_f$	Força de fricção	N
$F_g$	Força gravitacional	N
$F_{n1}; F_{n2}; F_{n3}$	Força de reação normal a superfície 1, 2 e 3	N
$G$	Aceleração gravitacional	$m \cdot s^{-2}$
$l_e$	Abertura do dosador	mm
$l_{vane}$	Comprimento da palheta no disco	m
$M$	Massa da partícula	kg
$\dot{m}_e$	Vazão mássica do sistema dosador experimental	$kg \cdot s^{-1}$
$R$	Raio do disco	m
$r_p$	Raio de pitch da palheta	rad
$r_{vane}$	Raio da palheta montada no disco	m
$r_{vaneC}$	Raio da palheta C montada no disco	m
$r_{vaneL}$	Raio da palheta L montada no disco	m
$r_{vaneV}$	Raio da palheta V montada no disco	m
$T$	Tempo	s
$t_0$	Tempo inicial	s
$t_1$	Tempo intermediário	s
$t_2$	Tempo final	s
$v_H$	Velocidade resultante horizontal	$m \cdot s^{-1}$
$v_R$	Velocidade radial	$m \cdot s^{-1}$
$v_T$	Velocidade tangencial	$m \cdot s^{-1}$
$\alpha_{lv}$	Ângulo de palheta em relação ao centro do disco	rad
$\mu_d$	Coefficiente de fricção entre partícula e o disco	Adimensional
$\mu_s$	Coefficiente de fricção estático	Adimensional
$\mu_v$	Coefficiente de fricção entre partícula e o disco	Adimensional
$P$	Massa específica	$kg \cdot m^{-3}$
$\theta_{out}$	Ângulo de saída da partícula do sistema de discos	rad
$\dot{\theta}$	Velocidade angular do disco	$s^{-1}$
$\dot{\theta}_{540}$	Velocidade angular a 540 rpm	$s^{-1}$
$\dot{\theta}_{810}$	Velocidade angular a 810 rpm	$s^{-1}$

## ÍNDICE

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 Objetivos.....	16
1.2 Justificativa.....	16
1.3 Hipótese.....	17
1.4 Metodologia.....	17
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1 Máquinas distribuidoras de fertilizante .....	18
2.1.1 Aplicadores de fertilizantes e corretivos de queda-livre .....	19
2.1.2 Aplicadores pneumáticos de fertilizantes e corretivos .....	20
2.1.3 Aplicadores centrífugos de fertilizantes e corretivos .....	21
2.1.3.1 Distribuidores rotativos .....	22
2.1.3.2 Distribuidores inerciais.....	23
2.1.3.3 Ensaios de distribuição transversal.....	24
2.2 Mecanismos dosadores .....	25
2.2.1 Gravimétricos .....	25
2.2.2 Volumétricos .....	26
2.3 Mecanismos distribuidores .....	28
2.3.1 Queda livre .....	28
2.3.2 Pneumático .....	29
2.3.3 Inercial.....	30
2.3.4 Rotores.....	30
2.3.4.1 Concavidade do rotor .....	31
2.3.4.2 Número de palhetas .....	33
2.3.4.3 Comprimento das palhetas .....	34
2.3.4.4 Posição radial das palhetas .....	34
2.3.4.5 Altura relativa dos discos .....	35
2.3.4.6 Perfis das palhetas .....	36
2.4 Propriedades de lançamento de fertilizante.....	37
2.4.1 Ponto de queda do produto no disco.....	38
2.4.2 Regime friccional de lançamento .....	39
2.4.2.1 Forças de impulsão no fertilizante.....	41

2.4.2.2	Forças de resistência no fertilizante.....	42
2.4.2.3	Rotação do sistema de discos .....	44
2.4.2.4	Velocidade de ejeção .....	44
2.4.2.5	Ângulo de ejeção .....	47
2.4.3	Trajétórias balísticas .....	48
2.4.3.1	Translação das partículas.....	48
2.4.3.2	Rotação das partículas .....	49
2.4.3.3	Local de deposição .....	50
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>52</b>
3.1	Hipótese .....	52
3.2	Planejamento Experimental.....	52
3.3	Aparato experimental .....	54
3.4	Caracterização do material granular .....	59
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>62</b>
4.1	Propriedades de lançamento das partículas .....	62
4.2	Uniformidade das propriedades de lançamento.....	66
4.3	Efeitos da rotação e vazão mássica.....	69
4.4	Comparativo das propriedades de lançamento .....	71
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>74</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>76</b>



# 1 INTRODUÇÃO

A distribuição de fertilizantes por meios centrífugos é uma das mais difundidas opções de aplicadores disponíveis para os agricultores no mundo. Estes equipamentos são de baixo custo, fácil manutenção e grande largura de deposição. Da mesma maneira, apesar do processo de lançamento ser relativamente simples, sua variabilidade é alta e necessita de regulagens específicas para cada tipo de fertilizante e modelo de máquina. Os fabricantes de distribuidores centrífugos apresentam várias configurações dos mecanismos distribuidores e as mais variadas eficiências. Sua relação com forças e parâmetros de lançamento não é muito bem modelada, apesar do esforço de décadas de pesquisa. Regulamentações ambientais e o aumento do custo de fertilizante estão levando à necessidade de aprimoramento na compreensão e eficiência das máquinas e do processo.

Estudos sobre os sistemas de lançamento centrífugo raramente se detêm nas palhetas, muito menos em seus perfis. Considerando que todo o material arremessado sofre influência da ação das aletas, seus perfis podem ser determinantes para a regularidade e repetitividade do padrão de distribuição, garantindo maior eficiência e aplicabilidade para o equipamento.

## 1.1 Objetivos

O objetivo deste estudo é verificar a existência de uma relação entre a geometria do perfil transversal de palheta e as forças de resistência que seja capaz de alterar significativamente as propriedades de saída das partículas do sistema.

## 1.2 Justificativa

Distribuidores centrífugos rotativos, por serem equipamentos de simples construção, são relativamente baratos e capazes de serem produzidos em massa. Devido ao seu baixo custo, robustez e grande largura de trabalho sua utilização é ampla como o impacto de seus problemas. Testes complexos e dispendiosos são a única opção para a regulagem correta do equipamento, permitindo que o perfil de distribuição seja adequado para o uso. Os discos de distribuição são a parte mais importante do sistema, pois são os responsáveis pela aceleração e

lançamento do fertilizante ou corretivo, e as palhetas são o ponto de contato e transferência de energia para as partículas. Sendo de vital importância, a compreensão da influência da palheta nos parâmetros de lançamento do material granulado pode levar a novos patamares de confiabilidade, regularidade e controle, mitigando as dificuldades deste tipo de distribuição.

### **1.3 Hipótese**

Para uma mesma quantidade de material granulado por palheta e rotação dos discos, as mudanças geométricas do sistema de aletas podem afetar significativamente os parâmetros de lançamento das partículas de fertilizante. Estas diferenças são devido às mudanças nos ângulos de contato que promovem a dissipação de energia por forças de fricção, medidas pelo ângulo de ejeção do conjunto de partículas em vários pontos de sua trajetória próxima ao sistema de discos, antes do declínio causado por forças gravitacionais.

### **1.4 Metodologia**

Para a obtenção das propriedades de lançamento do fertilizante foi utilizado um sistema de imagem anexado a um aparato experimental, responsável por fornecer movimento ao disco. O particulado foi caracterizado por suas propriedades granulares, parâmetros de operação e projeto do conjunto disco/palheta.

As imagens obtidas pelo sistema serão processadas para extração de detalhes e de propriedades médias. Irá ser realizada uma análise estatística dos dados coletados para inferir se existe diferença significativa entre os perfis de palheta e suas respectivas velocidades e ângulos horizontais de lançamento.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Máquinas distribuidoras de fertilizante

Os equipamentos distribuidores de fertilizantes têm a tarefa de aplicar adubo de forma uniforme e na dose indicada, afirma Oritz-Cañavate (2003). Para cumprir com as diversas exigências dos usuários foram desenvolvidos vários mecanismos e máquinas que desempenham o mesmo papel, mas de maneiras diferentes. Segundo Srivastava et al. (2006), todos os equipamentos distribuidores de fertilizante precisam desempenhar as seguintes etapas sequenciais para garantir a deposição de adubo: dosagem, transporte, distribuição e deposição.

Como os processos são sequenciais, os mecanismos para estas tarefas estão interligados: um mecanismo faz a dosagem e transporte até o dispositivo de distribuição que realiza a deposição do material. Estes processos são determinantes para a classificação do tipo de máquina, vazão de fertilizante, forma e largura de trabalho, já que são os principais processos para a distribuição de material sólido.

Distinguem-se dois grandes grupos de equipamentos, conforme sua forma de deposição:

- a) Largura fixa de distribuição igual à largura da máquina
  - Queda-livre: após a dosagem o fertilizante cai ao solo por efeito da gravidade.
  - Pneumáticas: o produto é dosado e arrastado por um fluxo de ar pressurizado até bocais de saída, que o dispersam.
  - Em linhas: depositam o fertilizante junto ou próximo da semente ou planta.
- b) Largura de distribuição variável
  - Centrífugas: após a dosagem o fertilizante é arremessado por elementos giratórios ou oscilantes por efeito da pseudo-força centrífuga. A largura de deposição é muito maior que a da máquina.

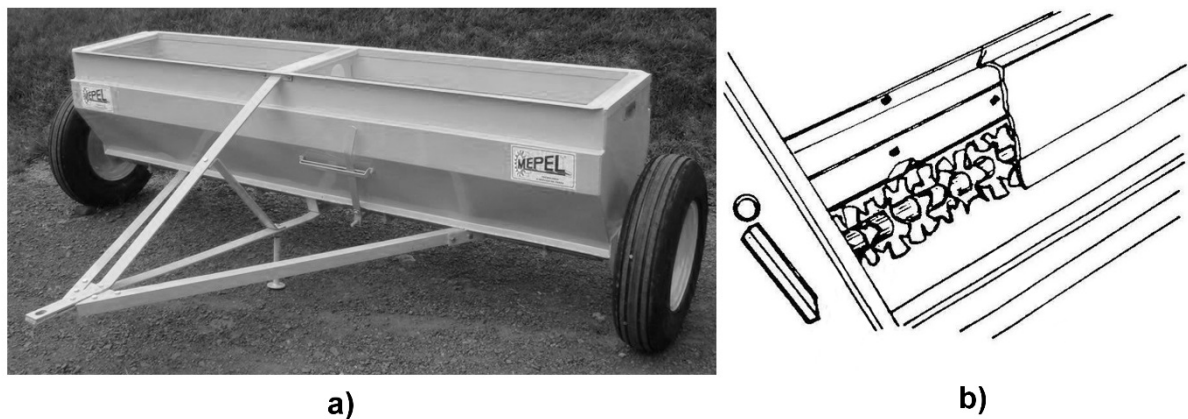
Máquinas distribuidoras de largura variável também são referidas como distribuidoras a lança, arremessando material granular uniformemente pelo campo. Enquanto a deposição em faixas estreitas, em equipamentos de largura fixa, são chamadas de aplicação de banda e em linha, ocorrendo durante a semeadura ou em plantas já estabelecidas. Ambos os tipos são

formados por três elementos principais, o reservatório de material granulado, o mecanismo dosador e o mecanismo de distribuição.

### 2.1.1 Aplicadores de fertilizantes e corretivos de queda-livre

Máquinas tradicionais de aplicadoras de materiais granulares com dispositivos de queda-livre são compostas de um reservatório transversal que cobre toda a largura de trabalho da máquina, configurando-se como uma distribuidora em faixas ou em linhas explica, Ortiz-Cañavate (2003). Existem configurações autopropelidas, com capacidade para aplicação em até 15 metros de largura, enquanto modelos tratorizados geralmente ficam entre 2,4 a 3,7 metros. A Figura 1 apresenta um modelo tratorizado.

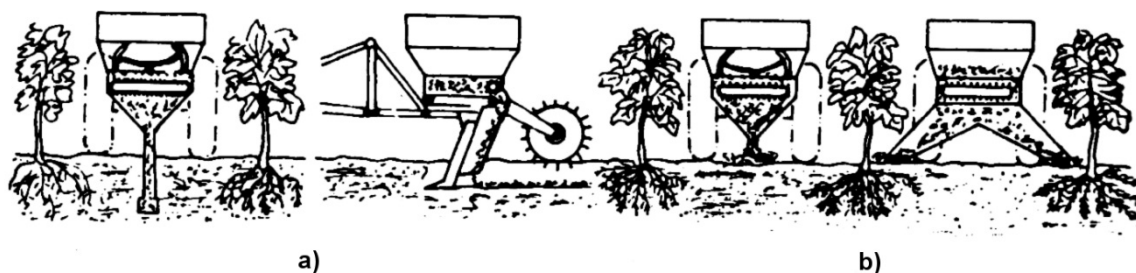
Figura 1 – Distribuidor de fertilizante e corretivo de largura fixa por gravidade (a) MEPEL DC 1500; (b) detalhe dos mecanismos internos.



Fonte: (a) MEPEL, 2014a; (b) ORTIZ-CAÑAVATE, 2003.

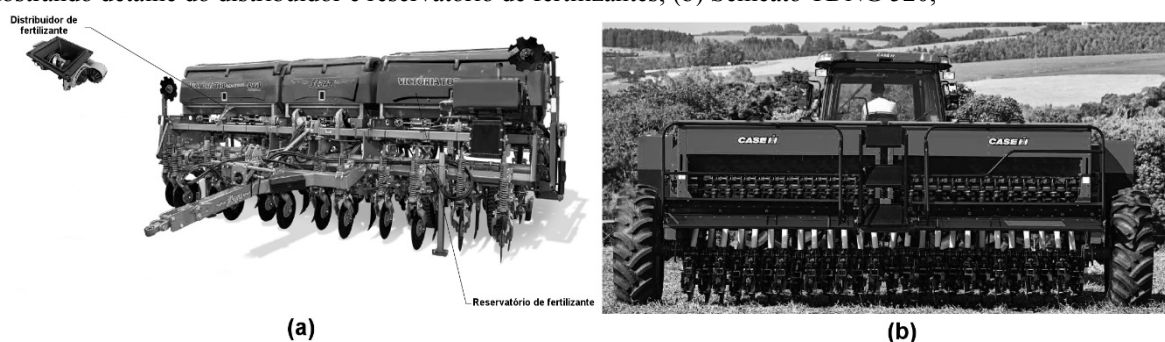
Estes equipamentos possuem dosadores de princípios gravimétricos presentes no fundo do reservatório, que contam com um obturador como controle de fluxo e outro dispositivo com ligação ao solo para o agitação do produto, afirmam Srivastava et al. (2006). Aplicadoras de linhas individuais depositam fertilizante próximo a planta, na superfície ou em um sulco, com vários orifícios onde o material flui após a dosagem. As Figura 2 e 3 exibem desenhos esquemáticos e modelos de linhas individuais.

Figura 2 – Mecanismos distribuidores em distribuidoras em linhas individuais: a) em profundidade; b) na superfície.



Fonte: ORTIZ-CAÑAVATE, 2003.

Figura 3 – Semeadoras e distribuidoras de fertilizante de largura fixa em linha: (a) Stara Victória TOP 4950 mostrando detalhe do distribuidor e reservatório de fertilizantes; (b) Semeato TDNG 520,



Fonte: (a) STARA, 2014. (b) CASE, 2012.

Distribuidoras de superfície (Figura 3) são muito utilizadas em conjunto com semeadoras, depositando o adubo dosado diretamente no solo com ou sem a presença de um difusor, enquanto as máquinas de profundidade apresentam linhas de elementos sulcadores em conjunto com tubos que levam o fertilizante até o sulco.

Aplicadoras em faixas (Figura 1) diferem no dispositivo de distribuição, que não prima por manter um fluxo de material granular separado entre os orifícios. Seu objetivo é combinar o escoamento de várias fendas para criar uma faixa uniforme de aplicação. Estas máquinas contam também com dosadores gravimétricos e agitadores ligados ao solo. Como sua faixa de aplicação é constante, não necessitam de sobreposição.

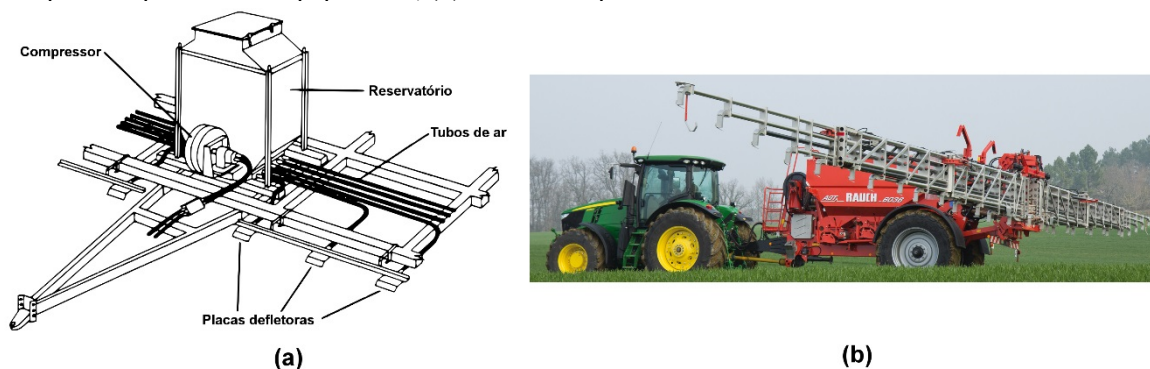
### 2.1.2 Aplicadores pneumáticos de fertilizantes e corretivos

Estas máquinas apresentam dispositivos de ar pressurizado para o transporte e distribuição do adubo mineral. Srivastava et al. (2006) a define como uma máquina versátil, capaz de realizar distribuições tanto a lanço quanto em faixas. Os modelos mais comuns são

suspensos por um trator, (Figura 4), e possuem uma largura de trabalho de até 24 metros. Ortiz-Cañavate (2003) explica que o equipamento é composto de um reservatório prismático triangular com um mecanismo dosador do tipo roda-dentada proporcional a velocidade do equipamento, ligado a um ventilador conectado a tomada de potência do trator responsável por insuflar o sistema. O fertilizante é levado através de vários tubos com comprimentos diferentes até a saída, que pode ser simples, sem acessórios, ou com a presença de um difusor.

Apesar da necessidade de uma pequena sobreposição quando está trabalhando como distribuidor à lanço, tem alta uniformidade.

Figura 4 – Distribuidor de fertilizante e corretivo de largura fixa por sistema pneumático: (a) esquema dos principais componentes do equipamento; (b) distribuidor pneumático Rauch AGT 6036.



Fonte: (a) SRIVASTAVA et al., 2006. (b) RAUCH, 2014.

### 2.1.3 Aplicadores centrífugos de fertilizantes e corretivos

Srivastava et al. (2006) definem distribuidores centrífugos como máquinas dotadas de dispositivos que efetuam lançamento das partículas. São compostas por reservatórios com mecanismos dosadores e distribuidores, com discos rotativos ou tubos pendulares. Ambas as configurações podem ser montadas no trator, com capacidade de carga entre 500 a 2.000 kg, ou rebocadas de 4.000 a 7.000 kg. Máquinas autopropelidas possuem capacidades ainda maiores, chegando a 25.000 kg.

A sua forma geral de construção, aponta Ortiz-Cañavate (2003), contém um depósito de adubo com um dosador na sua parte inferior e um mecanismo de lançamento de fertilizante que imprime energia às partículas. Após o agitação e a dosagem o fluxo de grãos cai sobre o dispositivo de lançamento e é depositado no solo após terminar sua trajetória balística pelo ar. Apesar de sua grande largura de trabalho, estes sistemas de distribuição não são recomendados para particulados finos, como é o caso de corretivos em pó. O lançamento das

partículas as leva a ficar em suspensão e o material, suscetível a correntes de vento cruzadas, modificando o padrão de distribuição e tornando o processo ineficiente.

### 2.1.3.1 Distribuidores rotativos

Distribuidores centrífugos rotativos, como o presente na Figura 5, recebem o adubo em uma posição fora-de-centro em relação ao eixo do disco, onde as partículas são apanhadas e aceleradas pelas palhetas, que podem ser de duas até seis. Sua rotação, segundo Ortiz-Cañavate (2003), tem o intervalo de 540 a 1000 rpm na tomada de potência com comprimentos de palhetas entre 0,3 e 0,45 m, sendo capaz de propelar fertilizante de 8 a 40 m de distância.

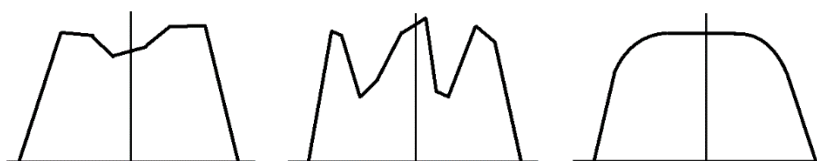
Figura 5 – Distribuidor de fertilizante e corretivo de largura variável por sistema centrífugo de disco Valtra Fertilizer BDF 1300 M.



Fonte: VALTRA, 2014.

Quando a aplicação de fertilizante ocorre por lançamento, é necessário verificar qual é o padrão de distribuição transversal que este equipamento é capaz de produzir. O padrão de distribuição é o resultado da aplicação e deve ter uma forma regular para garantir que a dose necessária para a cultura seja entregue da melhor forma possível, sem regiões de excesso ou falta de adubo. As principais formas do padrão para equipamentos rotativos estão presentes na Figura 6. Como característica do sistema de discos, a largura de aplicação máxima é maior que a largura de aplicação útil e são necessárias sobreposições no campo, enfatizando que os perfis mais regulares são melhores. Estes são funções de muitas variáveis, mas principalmente da máquina, suas regulagens e do fertilizante empregado.

Figura 6 - Exemplos de perfis de distribuição: M, W e regular.



Fonte: Adaptado de PARISH, 1999.

Distinguem-se dois modelos em função da quantidade de discos: o modelo simples e o duplo. Por sua forma construtiva, há diferenças no padrão de distribuição para cada modelo. Discos duplos tendem a ter uma forma simétrica e regular, além de uma largura útil maior. Discos simples apresentam um padrão de apenas um dos discos, não são simétricos e tem área de cobertura menor. Ortiz-Cañavate (2003) aponta que as principais regulagens de sistema de discos para um dado fertilizante com certa granulometria incluem:

- Posição de abertura do mecanismo de dosagem;
- Velocidade da máquina;
- Tipo de discos;
- Posição e tipo das palhetas;
- Altura e inclinação da máquina em relação ao solo;
- Tamanho do reservatório;

Existem outras variáveis, mas estas são dependentes das opções e possibilidades que cada máquina oferece.

### 2.1.3.2 Distribuidores inerciais

Modelos de distribuidores pendulares, (Figura 7), diferem dos sistemas de discos pela utilização de um dispositivo oscilatório para a imposição de energia cinética nas partículas. Ortiz-Cañavate (2003) explica que o mecanismo é composto de um tubo oco, o qual recebe fertilizante após a dosagem, impelindo as partículas até a saída do sistema. Geralmente, estes equipamentos necessitam de menor sobreposição que os demais.



Figura 7 – Distribuidor de fertilizante e corretivo de largura variável por sistema pendular Land Pride PFS4000.

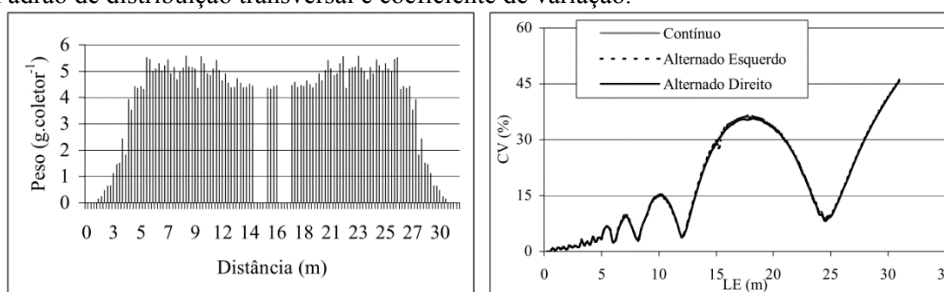


Fonte: LAND PRIDE, 2014.

### 2.1.3.3 Ensaios de distribuição transversal

O ensaio normatizado (ISO 5690; ASABE S343.1) consiste em posicionar recipientes na largura máxima indicada e realizar uma distribuição transversal nas condições requeridas com o equipamento. O fertilizante é recolhido dos recipientes, o peso e a posição são coletados e os dados são analisados. Um exemplo de perfil de distribuição pode ser visto na Figura 8, onde são relacionados o peso e a distância de cada coletor. Ortiz-Cañavate (2003) explica que partindo do padrão levantado experimentalmente é possível inferir a zona de cobertura que produzirá a distribuição mais uniforme. O critério geral utilizado é o coeficiente de variação, CV, que é calculado como a razão entre o desvio padrão de cada amostra e a média da quantidade de fertilizante obtido em cada recipiente. Uma representação gráfica dos valores do coeficiente de variação também está na Figura 8.

Figura 8 – Padrão de distribuição transversal e coeficiente de variação.



Fonte: MOLIN; MENEGATTI, 2003.

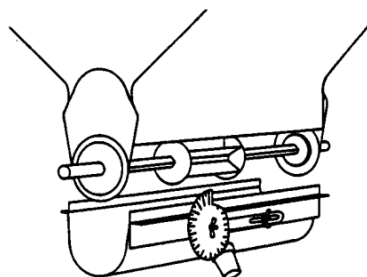
## 2.2 Mecanismos dosadores

Srivastava et al. (2006) divide os dosadores entre volumétricos ou fluxo positivo e gravimétricos. Dosadores positivos são mais precisos determinando a dosagem pela taxa de movimento. Modelos gravitacionais contam com a área de saída como controle de fluxo, e a pressão da coluna de material como força para taxa de movimentação.

### 2.2.1 Gravimétricos

Dispositivos gravimétricos, como o da Figura 9, controlam o fluxo de fertilizante e taxa de dosagem com o ajuste da área de aberturas presentes na parte inferior do reservatório. Normalmente, estes mecanismos são acompanhados de agitadores próximos dos orifícios de saída que homogeneízam e mantém o fluxo constante para o distribuidor.

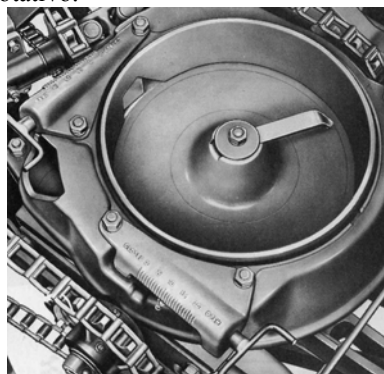
Figura 9 - Mecanismo dosador gravimétrico.



Fonte: SRIVASTAVA et al., 2006.

Dosadores de fundo móvel, exemplificados pela Figura 10, possuem uma placa rotativa com raspador, alojada contra o fundo do reservatório. Esta placa está próxima a uma ou mais escotilhas móveis que controlam a saída do produto para o distribuidor, explicam Srivastava et al. (2006).

Figura 10 - Dosador de fundo móvel rotativo.



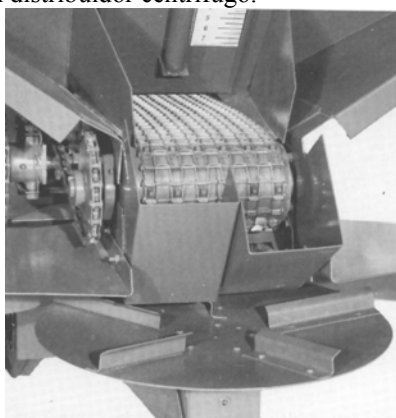
Fonte: SRIVASTAVA et al., 2006.

### 2.2.2 Volumétricos

Dosadores de fluxo positivo ou volumétricos possuem um dispositivo que mobiliza o fertilizante para dosagem até a distribuição. Este mecanismo pode ou não estar ligado com a máquina e seu sistema de movimentação para tornar a vazão proporcional a velocidade. O controle da taxa nestes casos se dá pela modificação da relação de transmissão entre ambos.

Modelos do tipo correia ou esteira, presente na Figura 11, são utilizados quando altas taxas são requeridas segundo, Srivastava et al. (2006). A correia pode ser lisa ou do tipo corrente cuja função é arrastar o material no fundo do reservatório acabando em uma escotilha, seguindo para o mecanismo de distribuição. Neste modelo a taxa de descarga é ligada à velocidade da correia e a abertura da comporta.

Figura 11 - Dosador de esteira em um distribuidor centrífugo.

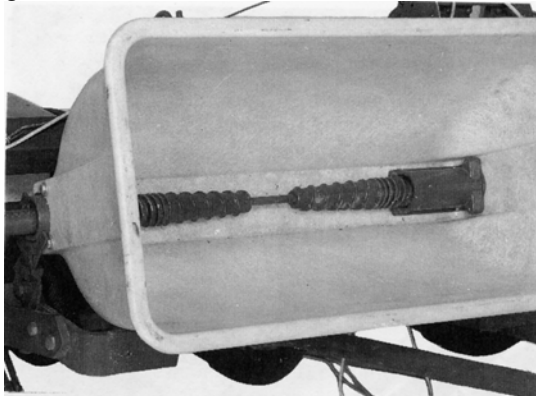


Fonte: SRIVASTAVA et al., 2006.

Mecanismos de rosca sem-fim, segundo Silveira (2001), admitem o fertilizante na rosca axialmente ou radialmente, podendo contar com o auxílio de um agitador, sendo

transportado por dentro da rosca alojada em uma camisa que a cobre parcialmente até um orifício de saída regulável. Este tipo de dosador tem uma ou duas saídas, como mostra a Figura 12. A taxa de descarga é função da rotação do fuso e da abertura do orifício de saída.

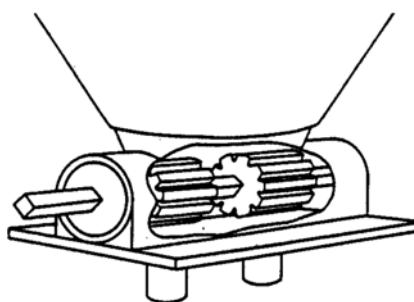
Figura 12 - Dispositivo de dosagem de rosca-sem-fim com duas saídas.



Fonte: SRIVASTAVA et al., 2006.

Dosadores de rodas dentadas, esquematizados na Figura 13, são montados no fundo do reservatório onde admitem uma pequena quantidade de fertilizante no espaçamento entre cada dente. Este produto é levado, pela rotação do eixo da roda dentada, até uma câmara que é conectada ao mecanismo distribuidor. Esta câmara conta com uma escotilha regulável entre ambos dispositivos. Srivastava et al. (2006) afirma que podem ser montados vários dosadores conectados ao mesmo eixo ao longo do reservatório para suprir múltiplas saídas.

Figura 13 - Dosador de rodas dentadas com duas saídas.



Fonte: SRIVASTAVA et al., 2006.

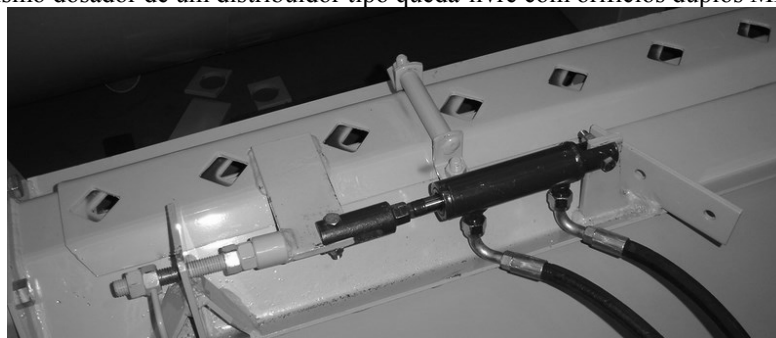
## 2.3 Mecanismos distribuidores

Ortiz-Cañavate (2001) levanta três tipos principais de distribuidores: gravimétricos, pneumáticos e centrifugos. Todos possuem a mesma função, admitir o fertilizante dosado e depositar no solo, mas realizam de forma diferente para necessidades diversas.

### 2.3.1 Queda livre

Podem ser simples orifícios secundários ao dosador, como é o caso do equipamento da Figura 14, ou tubos que levam o produto até seu local de deposição.

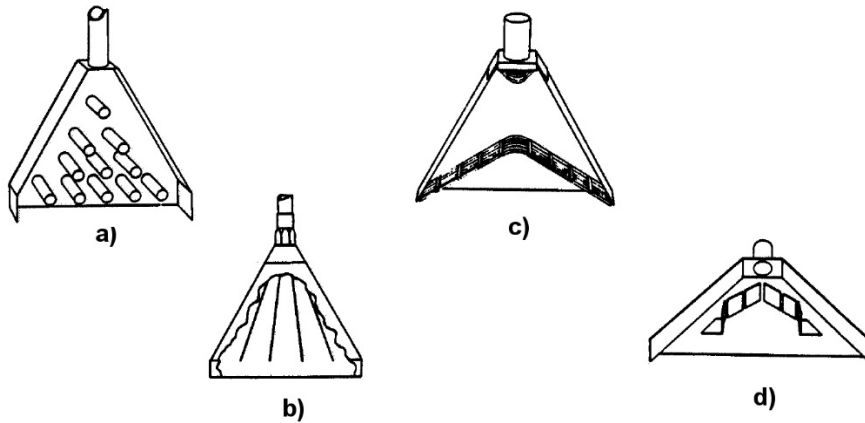
Figura 14 – Mecanismo dosador de um distribuidor tipo queda-livre com orifícios duplos MEPEL DC 1500.



Fonte: MEPEL, 2014b.

A saída destes tubos pode apresentar difusores (Figura 15) em forma de V invertido com uma variedade de partes internas desenhadas para homogeneizar o fluxo de material para a distribuição em faixas, conforme explica Srivastava et al. (2006). São fixados no final dos tubos ou orifícios.

Figura 15 - Exemplos de difusores usados em aplicadores de queda-livre: (a) barras; (b) separadores; (c) grade difusora; (d) aletas separadoras.

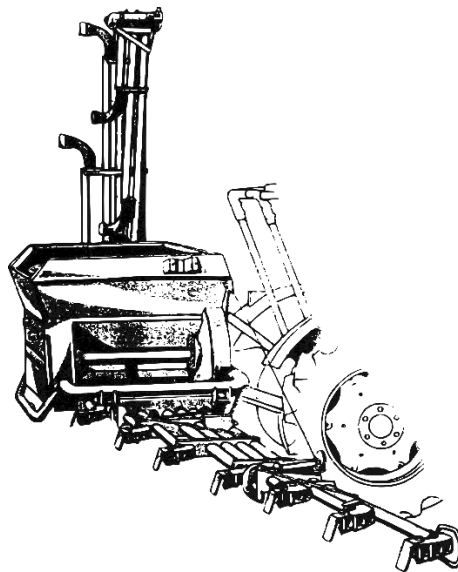


Fonte: SRIVASTAVA et al., 2006.

### 2.3.2 Pneumático

Distribuidores pneumáticos, afirmam Srivastava et al. (2006), são essencialmente tubos lisos que levam o fertilizante dosado pelo fluxo de ar comprimido até a saída do sistema que pode ou não conter dispersores. Quando o material granular atinge os dispersores, perde energia e é distribuído de maneira uniforme em uma área maior que a original do tubo. O sistema está presente na Figura 16.

Figura 16 - Aplicadora pneumática esquematizada. Os tubos e os dispersores retangulares nas pontas são o sistema distribuidor.



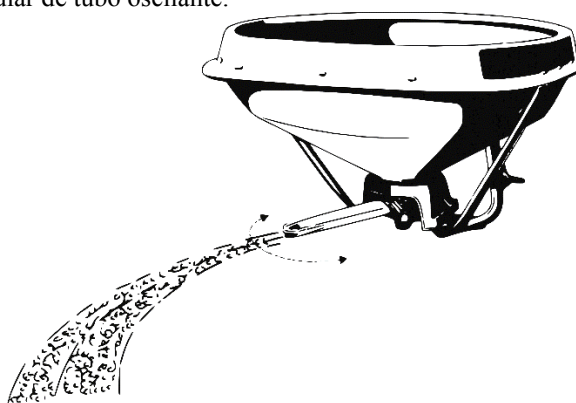
Fonte: ORTIZ-CAÑAVATE, 2003.

As saídas são espaçadas de 0,25 m a 1,0 m, segundo Silveira (2001), e podem ser desconectadas individualmente, permitindo uma largura regulável de distribuição com boa exatidão e sem a necessidade de testes. Apesar de suas vantagens, não é indicado para a aplicação de doses maiores que 1000 kg/ha, pois os tubos de saída podem entupir com a grande quantidade de material transportado.

### 2.3.3 Inercial

Mecanismos pendulares são dispositivos que impõem um ganho em energia cinética pela ação da pseudo-força centrífuga de forma alternada para o lançamento do fertilizante. O distribuidor (Figura 17) é composto de um sistema, mecânico ou hidráulico, que provê o movimento oscilatório e um tubo em formato cônico com a ponta ajustável que lança o material.

Figura 17 - Aplicadora pendular de tubo oscilante.



Fonte: ORTIZ-CAÑAVATE, 2003.

A frequência média do sistema é de cerca de 6,67 Hz (400 ciclos/min), resultando numa largura média de 6 m a 12 m total de deposição.

### 2.3.4 Rotores

O mecanismo de distribuição por discos rotativos, em semelhança ao sistema pendular, também impulsiona as partículas pela força centrífuga que seus rotores impõem no fertilizante. O sistema é composto por um ou dois discos circulares e múltiplas palhetas, conectadas ao acionamento que é acoplado ao dosador/agitador. Se o mecanismo apresenta

dois discos, estes rotacionam em sentidos opostos a fim de lançar material uniformemente e com grande largura de deposição. As Figura 18 e 19 apresentam duas máquinas, com um e dois discos respectivamente.

Figura 18 –Distribuidor centrífugo de um disco Stara Tornado 600 MD.



Fonte: STARA, 2010.

Figura 19 –Distribuidor centrífugo de dois discos Kuhn Axis 50.1.



Fonte: KUHN, 2013.

A distribuição de material granular por meio de discos é extremamente complexa e delicada. Desde o ponto de descarga, tanto as condições ambientais quanto a posição das palhetas têm influência sobre o local de deposição e a largura efetiva que a máquina é capaz.

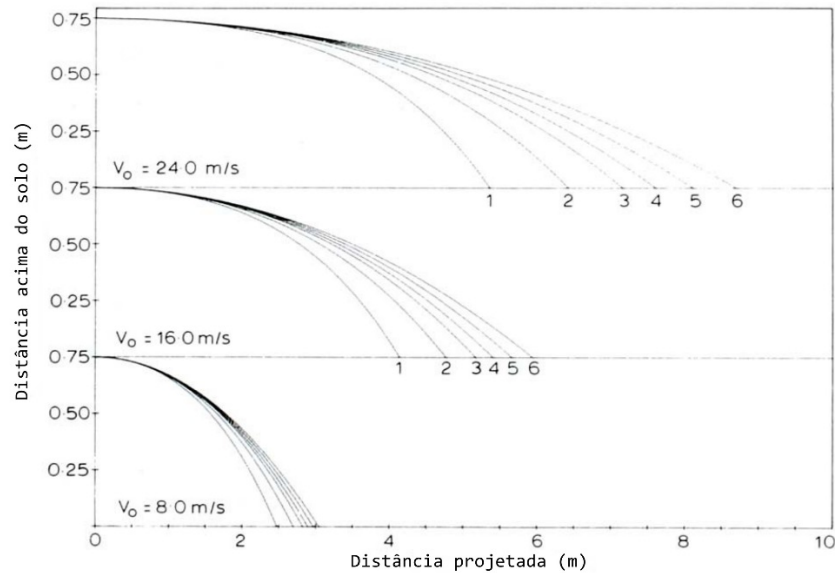
#### **2.3.4.1 Concavidade do rotor**

Os discos podem apresentar dois formatos distintos: planos ou côncavos. Discos planos tem como sua principal característica o lançamento dos grãos em uma trajetória balística sem velocidade inicial no sentido vertical, conforme demonstrado por Hofstee e



Huisman (1990) (Figura 20), onde são exibidas trajetórias para diferentes velocidades e coeficientes de arrasto aerodinâmico diferentes.

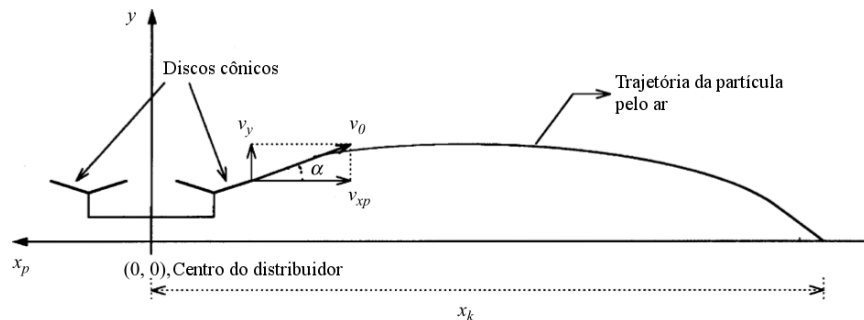
Figura 20 – Influência da velocidade de lançamento horizontal e do coeficiente de resistência aerodinâmica na trajetória da partícula. (1)  $K = 0,250$ ; (2)  $K = 0,150$ ; (3)  $K = 0,100$ , (4)  $K = 0,075$ ; (5)  $K = 0,050$ ; (6)  $K = 0,025$ .



Fonte: HOFSTEE; HUISMAN, 1990.

Discos cônicos lançam o pacote de fertilizante contido nas palhetas imprimindo uma velocidade inicial vertical não nula, unicamente devido à geometria da seção transversal do disco. Olieslagers et al. (1996) descrevem matematicamente e exemplificam o perfil da trajetória esperada de tais partículas (Figura 21).

Figura 21 – Trajetória da partícula em um disco cônico.



Fonte: OLIESLAGERS et al, 1996.

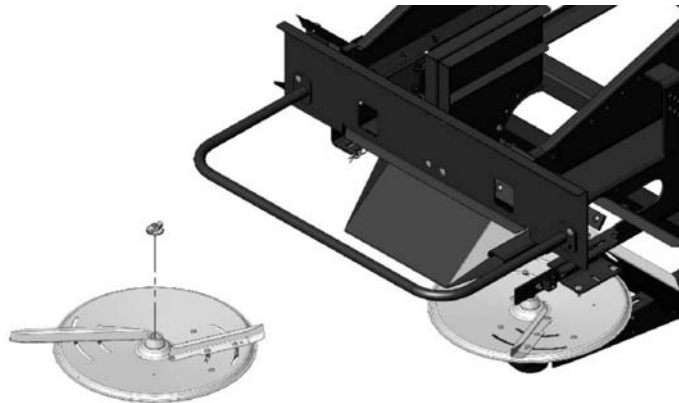
Hofstee (1995) afirma que o principal resultado de um ângulo de cone positivo é uma maior distância de voo das partículas, o que resulta em uma maior largura efetiva de distribuição, assumindo que o material não se aproxima da granulometria do pó. Pode

também ser vantajoso para diminuir a altura do sistema de discos, em relação ao solo, necessária para uma dada largura.

#### 2.3.4.2 Número de palhetas

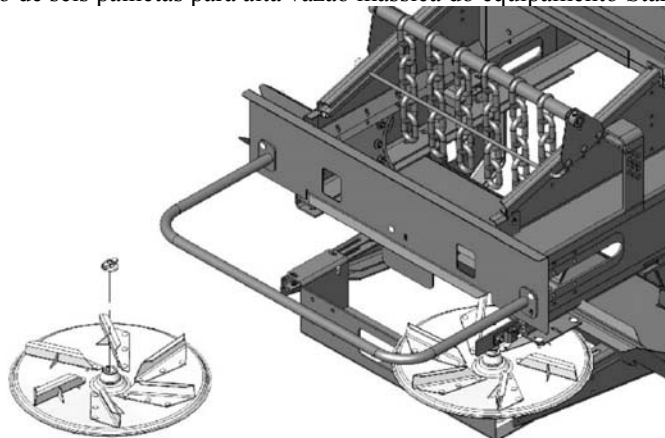
As aletas são acomodadas no disco em uma variedade de perfis, comprimentos, posições e quantidades diferentes. A tendência dos fabricantes é que a quantidade de palhetas em um disco, (Figura 22 e Figura 23), aumentem proporcionalmente com a vazão mássica de produto a ser lançado pelo equipamento. Vazões mássicas maiores necessitam de mais palhetas para a descarga, como é o caso de pós corretivos como calcário, que possuem partículas menores e densidades maiores. Fertilizantes que possuem menores vazões necessitam de menos palhetas para distribuir o produto.

Figura 22 – Configuração de duas palhetas para baixa vazão mássica do equipamento Stara Hércules 7000/10000.



Fonte: STARA, 2010.

Figura 23 – Configuração de seis palhetas para alta vazão mássica do equipamento Stara Hércules 7000/10000.



Fonte: STARA, 2010.

Yildirim e Kara (2012) explicam que, quando há um aumento da vazão mássica para uma mesma configuração de disco, seu padrão de distribuição tende a apresentar uma maior inconsistência. O efeito pode ser amenizado aumentando a rotação e o número de palhetas presentes no processo.

#### **2.3.4.3 Comprimento das palhetas**

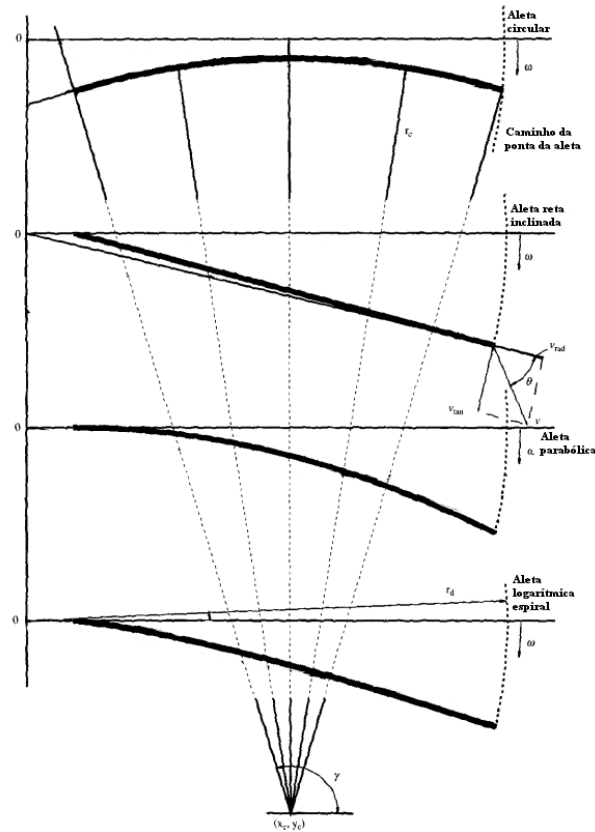
O comprimento da palheta, segundo Reumers et al. (2003b), tem influência direta na velocidade de lançamento das partículas. Tal afirmação foi complementada por Villette et al. (2010) onde os resultados de seus experimentos com fricção demonstraram que os valores do coeficiente diminuíram com o acréscimo do comprimento.

Reumers et al. (2003a) atribuíram um padrão de distribuição mais simétrico e com maior energia cinética, para aletas de maior comprimento. Uma maior velocidade de lançamento significa uma largura efetiva maior e um padrão de distribuição mais alargado, se as condições forem favoráveis à distribuição.

#### **2.3.4.4 Posição radial das palhetas**

A posição da palheta é definida por Hofstee (1995) como o ângulo entre a aleta e uma linha radial imaginária do disco, também chamado ângulo de intersecção. Em sua investigação, definiu quatro perfis longitudinais (Figura 24): circular, reto, parabólico e logarítmico. Traçou a diferença do ângulo da aleta em posições adiantadas ou atrasadas, e concluiu que, apesar de haverem divergências fortes próximas do centro do disco, esta diferença diminui drasticamente ao longo do disco. Apontou também que, em todos os casos, a maior mudança se dá com o perfil longitudinal da palheta, e não com o ângulo de posicionamento. Fica evidente que apesar de ser amplamente utilizado como regulagem de um perfil de deposição por sua praticidade para o usuário, as mudanças no perfil longitudinal da palheta vão influenciar muito mais o que o ângulo das palhetas no padrão de distribuição.

Figura 24 – Perfis longitudinais de palhetas.



Fonte: HOFSTEE, 1995.

Coetzee e Lombard (2011) ao investigar a posição radial de palhetas retas afirmaram que é clara a influência da mudança no perfil transversal de distribuição. Um aumento no ângulo de posição das palhetas alterou o padrão no sentido contrário à rotação do disco, o que pode levar a mudanças drásticas na largura e formato do perfil.

#### 2.3.4.5 Altura relativa dos discos

Uma das principais regulagens de qualquer equipamento distribuidor centrífugo, segundo Ortiz-Cañavate (2003), é a altura do sistema de discos em relação ao solo. Um sistema centrífugo de lançamento ao impelir energia cinética às partículas, as arremessa em uma trajetória balística. Não havendo interações significativas entre os grãos quando estão em voo, a sua trajetória segue os modelos tradicionais de movimento de projéteis.

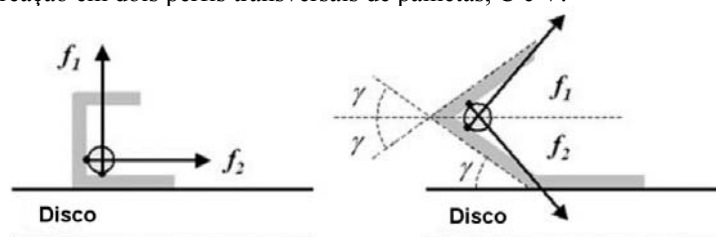
A influência da altura do sistema de discos pode ser deduzida pela análise do movimento de projéteis, como apresentado por Walker (2007). A maior distância da partícula ao solo é computada como um acréscimo de energia potencial no sistema, que leva a um

tempo de vôo maior para uma mesma velocidade e ângulo inicial. Portanto a partícula viaja mais longe, considerando que a distribuição ocorre em condições ideais, o perfil de distribuição e a largura efetiva aumentam. Os limites para estas regulagens se encontram nas condições atmosféricas e no tamanho da partícula. Ambas as variáveis podem contribuir para um padrão irregular e uma largura menor, já que os grãos ficam mais tempo expostos aos efeitos atmosféricos durante o voo.

#### 2.3.4.6 Perfis das palhetas

Perfis transversais, apesar de serem de suma importância para a definição dos parâmetros de lançamento, não se encontram facilmente na literatura. Foram brevemente discutidos por Villette et al. (2010) com apenas duas formas, C e V. Os autores argumentaram que a diferença entre os perfis ocasionou mudanças nas reações de fricção das partículas de fertilizante ao ponto de necessitarem de duas modelagens matemáticas diferentes para descrição do movimento. Ambas as aletas estão representadas na Figura 25, mostrando as forças de reação da partícula  $f_1$  e  $f_2$  e sua configuração geométrica para cada caso.

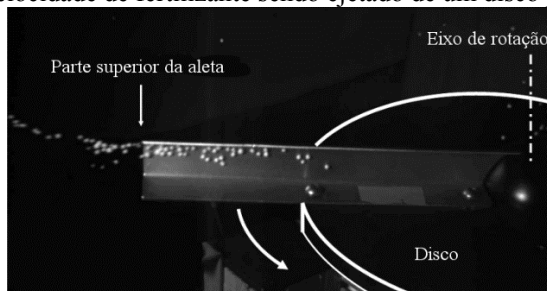
Figura 25 - Forças de reação em dois perfis transversais de palhetas, C e V.



Fonte: VILLETTE et al., 2010.

Resultados mostraram que além da fricção ser significativamente diferente entre as palhetas (a 5%), o perfil V possui menor desvio padrão, mostrando mais organização das partículas durante a descarga. Isto também é apresentado em uma investigação posterior dos mesmos autores, Villette et al. (2013), que utilizam um sistema fotográfico de alta velocidade para verificar as condições de lançamento do fertilizante em uma palheta em forma de “C” em um disco plano. O material ejetado nestas condições tem alto grau de desorganização pelo menor coeficiente de fricção com a palheta, se deslocando para a parte superior do perfil a altas velocidades (Figura 26).

Figura 26 - Imagem em alta velocidade de fertilizante sendo ejetado de um disco plano com palheta em perfil C.



Fonte: VILLETTE et al., 2013.

A influência do perfil transversal de palheta no padrão de distribuição pode ser deduzida pelo resultado da diferença do ângulo de lançamento de fertilizante já que é o parâmetro mensurado pelas investigações. Perfis que apresentarem ângulos de saída menores possuem uma largura efetiva menor e um padrão mais curto, enquanto perfis com ângulos de saída maiores têm uma largura efetiva maior e um perfil mais alargado.

## 2.4 Propriedades de lançamento de fertilizante

Modelos e experimentos específicos sobre o lançamento de partículas em distribuidores centrífugos foram desenvolvidos durante as últimas duas décadas, como os trabalhos de Hofstee e Huisman (1990) em sua série de artigos sobre manejo e distribuição de fertilizantes (HOFSTEE, 1992, 1994, 1995; HOFSTEE; HUISMAN, 1990) e de Olieslagers et al. (1996) no desenvolvimento de um modelo computacional para o cálculo dos padrões de distribuição de um sistema de discos centrífugos, utilizando-se das teorias já consolidadas na literatura. Mesmo estas primeiras abordagens holísticas sobre o tema exibem um fato que deve ser considerado: a mecânica granular pura se afasta neste ponto e em seu lugar são utilizados modelos específicos que levam em conta outras variáveis importantes como local de descarga, forma do disco e palheta e trajetórias balísticas.

Estudos mais recentes que utilizam o método dos elementos discretos (DEM), como Van Liedekerke et al. (2006) que descrevem a modelagem e validação experimental da dinâmica de partículas simuladas. Estes trabalhos não podem ser ignorados por fornecer detalhes importantes do comportamento físico do fertilizante, mas os detalhes do modelo computacional serão omitidos. Em contraste, trabalhos como de Villette et al. (2008) e Cointault et al. (2003) descartam modelos de fluxo no distribuidor e utilizam experimentos

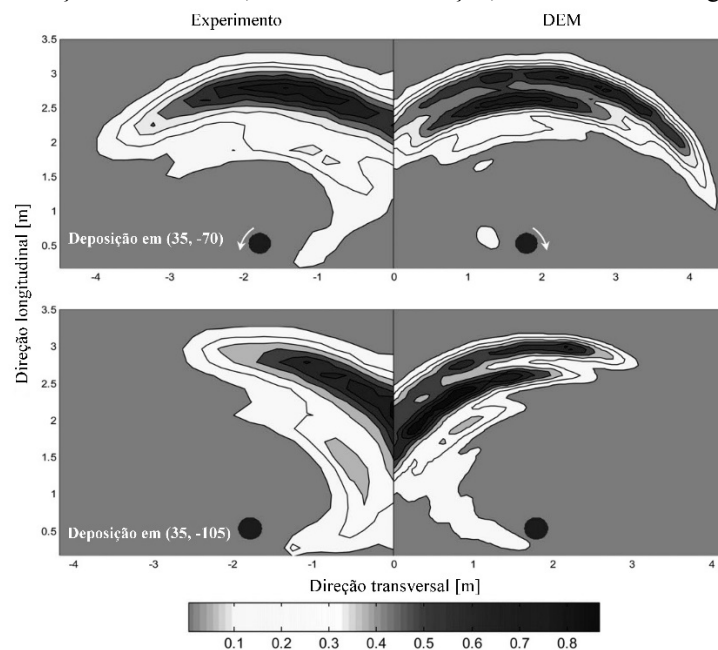
para obter dados do lançamento de fertilizante, que podem alimentar cálculos balísticos. Desta maneira, inferem padrões de distribuição com custo computacional bastante reduzido.

Qualquer que seja a modelagem do fenômeno, utilizam-se dois passos lógicos consecutivos para descrever o processo, afirmam Villette et al. (2013): a aceleração dos grãos no disco e o seu percurso balístico. Tomando por base a convenção da literatura, o mesmo tratamento será utilizado na presente revisão.

#### 2.4.1 Ponto de queda do produto no disco

A influência da posição de descarga do fertilizante no lançamento é geralmente determinada como um desvio no local de impacto das partículas se comparado à posição inicial de referência, conforme observado por Coetzee e Lombard (2011). É lógico identificar (Figura 27) que ao situar a descarga em uma posição no sentido horário em relação a posição padrão, o perfil de espalhamento tem a tendência de seguir na mesma direção e o mesmo é válido para a direção oposta. Considerando que as outras variáveis sejam mantidas constantes, o único parâmetro de ejeção que é modificado é o local de lançamento, enquanto o ângulo e a velocidade na maioria dos casos permanecem as mesmas. Há outros fenômenos que podem interferir e modificar levemente o padrão final, mas a tendência ainda assim se mantém.

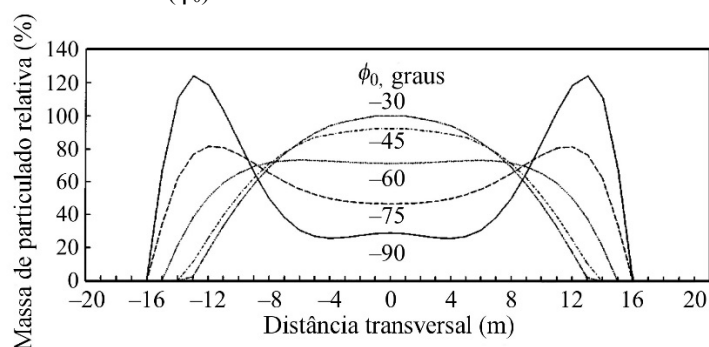
Figura 27 – Padrões de distribuição estacionários obtidos via experimental e DEM para diferentes posições de descarga no disco em relação ao seu centro, com a mesma rotação, vazão mássica e ângulo de palheta.



Fonte: COETZEE; LOMBARD, 2011.

Como resultado, Olieslagers et al. (1996) demonstram que os padrões transversais de distribuição em equipamentos de discos duplos sofrem com a mudança do perfil gaussiano, que é próprio para a sobreposição no campo, para perfil M, onde a sobreposição não traz uniformidade na aplicação do fertilizante. A Figura 28 representa os padrões de cinco posições onde é possível identificar a mudança conforme a alteração do local de descarga do fertilizante. Além disso, explicam que a forma do orifício de descarga pode também refletir no padrão final apresentando desde perfis gaussianos até perfis W. É importante salientar que, mesmo nestes casos, a velocidade e ângulo de lançamento não são afetados, apenas o local de ejeção.

Figura 28 – Simulação do padrão de distribuição para a variação da posição do orifício de descarga em relação a uma posição angular radial arbitrária ( $\phi_0$ ).



Fonte: OLIESLAGERS et al., 1996.

#### 2.4.2 Regime friccional de lançamento

Apesar das condições e locais de deposição do material granular ter grande influência no perfil transversal de distribuição, os parâmetros do próprio disco são mais importantes para as propriedades de lançamento. Palhetas, velocidade do disco e parâmetros de fertilizantes constituem o conjunto principal de variáveis que influenciam o resultado final. O regime friccional de lançamento é, à primeira vista, um problema simples. É quando os detalhes e nuances da mecânica granular são introduzidos em conjunto com o fluxo de milhares de grãos por minuto sendo lançados em um regime contínuo numa tentativa de obter um padrão regular de distribuição que suas facetas intrincadas surgem.

Há duas grandes abordagens para a descrição matemático-física da dinâmica no disco: abordagens analíticas e simulações computacionais por elementos discretos. Aphale et al.



(2003) mencionam que a modelagem analítica do problema específico do movimento de partículas em discos centrífugos é estudada exaustivamente desde a década de 1960 sem, entretanto, o desenvolvimento de um modelo unificado válido e preciso para as várias configurações básicas e tipos de fertilizantes devido a sua enorme variedade, além da dificuldade no controle e mensuração de propriedades básicas. A maior parte dos modelos analíticos derivados, explicam Hofstee e Huisman (1990), levam em consideração formas gerais de palhetas e de locais de descarga de fertilizante, forças de impulsão e de resistência. As equações fundamentais do movimento para discos planos de aletas retas derivadas por Dintwa et al. (2004) e Olieslagers et al. (1996), baseados nos trabalhos da década de 1960, utilizam a pseudo-força de Coriolis como origem da força de fricção por escorregamento entre a palheta e a partícula. A fricção por escorregamento entre o disco e a partícula é apenas função do peso do grão e a força de impulsão é proveniente da pseudo força centrífuga. É importante notar que os modelos não compreendem rolamento, colisões e nem eventuais saltos que possam ocorrer, sendo fundamentado em uma partícula única que escorrega pelas palhetas. Representando a equação fundamental de forma matemática, segundo Dintwa et al. (2004), tem a forma da equação (1):

$$m \frac{d^2 R}{dt^2} = m \dot{\theta}^2 R - \mu_d mg - 2\mu_v m \dot{\theta} \frac{dR}{dt} \quad (1)$$

onde  $m$  é a massa da partícula,  $R$  é o raio do disco,  $\dot{\theta}$  é a velocidade angular do disco,  $t$  é o tempo,  $\mu_d$  é o coeficiente de fricção da partícula com o disco e  $\mu_v$  é o coeficiente de fricção da partícula com a palheta.

Ambos os autores derivam a equação para rotores cônicos, mas como não é objeto deste estudo da presente revisão, não serão demonstrados. Aphale et al. (2003) vão um passo além e realizam uma análise de rolamento puro além de escorregamento puro, mas não obtém resultados precisos com nenhuma das abordagens. Afirma que é difícil a obtenção de um valor para este parâmetro, especialmente em situações práticas. Fica claro que a maior dificuldade da abordagem analítica é que as forças de resistência são representadas apenas por um coeficiente de fricção, e um simples coeficiente não pode representar de forma satisfatória um fenômeno com uma infinidade de interações entre inúmeras partículas ou aglomerados.

O método dos elementos discretos ou DEM, afirmam Van Liedekerke et al. (2006), é um procedimento computacional baseado nos conceitos da dinâmica molecular. O movimento

de cada grão é regido pela segunda lei de Newton, em sua forma discretizada, onde os contatos entre partículas são regidos por uma série de passos para detectar, modelar, resolver e iterar as forças e deformações envolvidas para cada passo temporal da solução. Fica implícito que o coração do DEM são os modelos de contato, como demonstram Jing e Stephansson (2007), onde são resolvidas as interações de curto alcance como partícula-partícula e partícula-parede, e as forças são inseridas no sistema. Isso permite que o método forneça resultados mais precisos em situações onde o modelo analítico não pode atuar, pois tem de modo inerente grande parte das interações que são descartadas pela abordagem clássica. Apesar do seu enorme potencial, o custo computacional é alto afirmam Van Liedekerke et al. (2006), o passo de tempo para iteração é curto, na ordem de microssegundos e, como qualquer método computacional, sua eficácia depende que os dados inseridos correspondam à realidade.

Coetzee e Lombard (2011) estudaram os efeitos de vários parâmetros no padrão de distribuição em detalhes, validando o método de elementos discretos com experimentos controlados. O DEM foi utilizado para simular o comportamento do fertilizante desde a descarga no disco até o lançamento, onde outro modelo foi utilizado para resolver as trajetórias balísticas. A introdução do método de simulação permitiu que fosse possível prever as tendências da maioria dos casos estudados com boas correspondências dos experimentos realizados. Já Van Liedekerke et al. (2009), relataram que para velocidades de ejeção baixas, de cerca de  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , o método dos elementos discretos teve bons resultados (desvios abaixo de 5%) nas estimativas de padrões de distribuição. Quando as velocidades cresceram as previsões perderam a precisão, indicando que o método necessita ser refinado para ser aplicável a velocidades praticadas no campo.

#### **2.4.2.1 Forças de impulsão no fertilizante**

A energia fornecida pelo sistema de acionamento é transferida para o disco e, conseqüentemente, para as palhetas que aceleram o fertilizante, impulsionando-o para o lançamento. O local de ação das forças de impulsão, como das maiores forças de resistência ao movimento, é nas palhetas e neste sentido são os componentes mais importantes do sistema. Sua ausência significaria que o processo de distribuição a lanço não existiria.

Hofstee (1995) definiu que as principais forças agindo nos grãos enquanto estão no disco são a inércia da partícula, a pseudo-força de Coriolis, a pseudo força centrífuga e a força

gravitacional, sendo decompostas em vetores paralelos e perpendiculares à palheta em questão. As componentes paralelas contribuem para a resistência ao movimento. O formato da palheta pode levar ao aparecimento de forças diferentes. A formulação matemática da equação diferencial de equilíbrio derivada utiliza multiplicadores que são específicos de cada forma de palheta e disco.

Olieslagers et al. (1996) trataram principalmente da descrição de forças e velocidades em discos cônicos e palhetas retas inclinadas, mas são mencionados detalhes das formulações de sistemas mais simples. Os esforços fundamentais são os mesmos mencionados no parágrafo anterior, sua origem é a mesma. Neste caso, os autores afirmam que a equação diferencial fundamental do movimento para o caso de discos e palhetas retas possui solução tanto analítica quanto numérica.

Dintwa et al. (2004) deduziram as equações diferenciais de movimento para os casos particulares e generalizados. No processo foram identificadas cinco pseudo-forças, para a impulsão no caso do disco e aletas retas se reduz apenas ao efeito centrífugo. É claro que esta análise não leva em conta as interações entre partículas, mas mesmo em simulações DEM seu efeito é difícil de ser determinado precisamente.

#### **2.4.2.2 Forças de resistência no fertilizante**

Sendo as palhetas os componentes mais importantes para a distribuição de fertilizantes granulares a lanço, os esforços de resistência ao movimento dos grãos são as variáveis mais influentes no padrão de dispersão. O conjunto de partículas gasta a energia cinética provida pelo movimento do disco em dois fenômenos distintos: fricção e colisões.

Hofstee e Huisman (1990) identificaram que a influência da fricção é mais proeminente na velocidade de lançamento, ângulo e posição de ejeção. Em termos práticos, maior coeficiente de fricção leva a maior tempo de contato com a aleta e conseqüentemente, uma menor velocidade e posição de lançamento diferente. Relataram que, nas medições experimentais para o coeficiente de escorregamento, obtiveram valores no intervalo de 0,15 a aproximadamente 0,70. O modelamento das colisões só levou em conta a restituição elástica, e a análise teórica reportada mostrou diferenças apenas na descarga no disco fora de centro, na interação palheta partícula. Mesmo nas medições experimentais do coeficiente de restituição não foram investigados os casos partícula-partícula.

Hofstee (1995) em outra investigação subsequente apenas estudando distribuidores centrífugos, reafirma que o coeficiente de fricção é extremamente importante, mas valores representativos não são fáceis de serem obtidos.

Aphale et al. (2003) evidenciam que uma das principais causas de problemas com o coeficiente de fricção é que a grandeza flutua entre medidas típicas de puro escorregamento e puro rolamento. Isso pode indicar que o regime de perda não é constante em apenas um modo e um valor único não é representativo.

Grift et al. (2006) encontraram valores médios de coeficientes de fricção para ureia de 0,36 com desvio padrão de 0,1. Também foi identificado que partículas maiores atingiram maiores velocidades se comparadas a partículas menores, definido claramente que a fricção é inversamente proporcional ao tamanho da partícula para este caso.

Van Liedekerke et al. (2006) utilizando o método DEM, identificaram que partículas submetidas ao rolamento tem menor tempo de permanência no disco, mas não significa que necessariamente perdem menos energia no caminho. O relacionamento entre ambos os modos de fricção é complicado pelo fato de que as forças normais de contato não são iguais ao peso da partícula. O fato é evidenciado pela tendência dos grãos subirem na palheta na presença de rotação demonstrando menor esforço normal entre a partícula e o disco. Quando as colisões entre o conjunto do disco e o grão de fertilizante foram identificadas foi possível concluir que a presença de restituição elástica leva o grão a um menor tempo de permanência sobre o disco e menor velocidade de lançamento. As colisões levam a saltos que reduzem o tempo de contato com a palheta, diminuindo a quantidade de movimento imposta.

Kweon et al. (2007) também conjecturaram, baseados em dados experimentais de coeficientes de fricção dinâmica, que o fertilizante não segue um caminho reto na palheta, mas sim um caminho oscilatório. Isto é apoiado pelo fato de que a variabilidade nos valores de fricção diminuiu progressivamente com uma maior rotação.

Van Liedekerke et al. (2009) estudaram um fluxo mássico via DEM e adicionaram algumas nuances nas forças de resistência. No caso da fricção parede-partícula, grãos esféricos são menos sensíveis a coeficientes maiores. As interações partícula-partícula são aleatórias e, portanto, seu efeito é menor se comparado a parede-partícula. A influência da restituição elástica também pode ser considerada reduzida.

Villette et al. (2010) desenvolveram o conceito de coeficiente de fricção equivalente, ou EFC. Seu valor corresponde a uma partícula em escorregamento puro na palheta com o mesmo comportamento que o fertilizante real nos parâmetros de ejeção. As medições

experimentais apontaram que para dois diferentes perfis (U e V) e comprimentos de palheta, os valores são significativamente menores para perfis V longos com o mesmo fertilizante a qualquer ângulo de inclinação. Finalmente, indica que o EFC pode ser usado como comparativo relativo entre fertilizantes no disco, já que materiais com o mesmo valor tem, em média, o mesmo comportamento, mas é importante notar que não são levados em consideração as propriedades balísticas nem nível de umidade neste coeficiente.

Coetzee e Lombard (2011) relataram em uma investigação com DEM em uníssono com o trabalho de Villette et al. (2008), que o aumento da fricção partícula-partícula não resultou numa mudança significativa. Um acréscimo de 0,1 para 0,5 promoveu uma mudança de 1,7° de rotação no padrão de distribuição na mesma direção que a rotação do disco, evidenciando maior permanência. Os autores apontaram que a provável razão para a pouca sensibilidade é que as forças partícula-palheta têm maior grandeza.

#### **2.4.2.3 Rotação do sistema de discos**

Ao contrário dos efeitos das forças de resistência e impulsão, a influência da rotação do disco é uma variável relativamente conhecida e estudada. Seus efeitos são aparentes e diretos no perfil de distribuição e nas propriedades de lançamento.

Coetzee e Lombard (2011) estudaram a influência da rotação do disco nos parâmetros de lançamento de fertilizante, utilizando três velocidades: 300 rpm, 400 rpm e 500 rpm. O aumento na rotação resultou em um menor tempo de permanência das partículas, maior distância do padrão de distribuição em relação ao disco e um ângulo maior de ejeção. Isso significa que o comportamento esperado dos grãos adquirirem maior velocidade em menor tempo foi observado. Investigações com velocidades maiores não foram possíveis, pois o modelo DEM utilizado se distanciou muito dos experimentos e os resultados não foram mais significativos.

#### **2.4.2.4 Velocidade de ejeção**

A velocidade de ejeção é considerada um dos parâmetros de saída do regime friccional de lançamento, ou seja, o final do caminho traçado pela partícula no equipamento. Juntamente com o ângulo é o resultado de todos os processos no qual o equipamento submeteu o

fertilizante. Dita como será a trajetória balística e o quão longe a partícula pode se deslocar até se chocar com o solo.

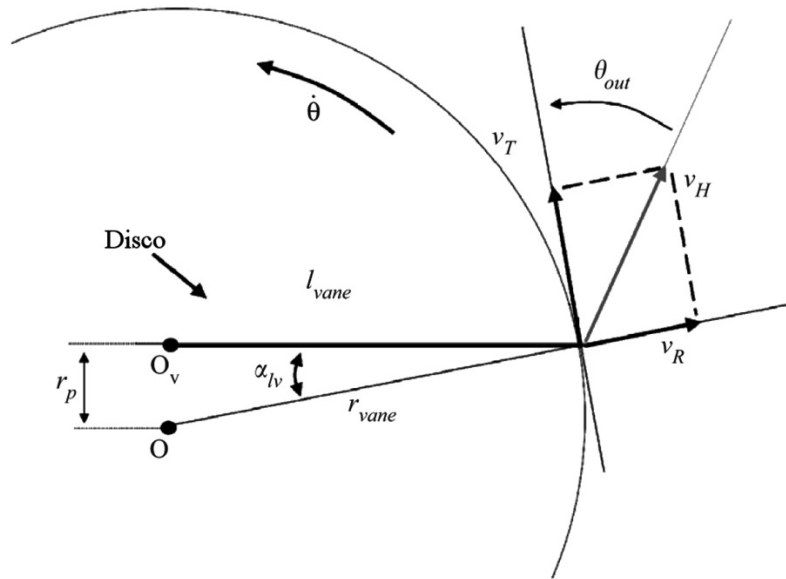
Grift e Hofstee (1997) mediram a velocidade de ejeção e diâmetros das partículas logo após sua saída do disco, com o intuito de substituir testes onerosos. Foi utilizado o mesmo equipamento que Reumers et al. (2003a), com sensores ópticos que varrem toda a área de lançamento do fertilizante, mensurando a velocidade com 5% de precisão e o diâmetro com 2%. Seu tamanho é reduzido e, portanto, não é capaz de aferir propriedades médias dos pacotes de grãos.

Reumers et al. (2003a) em seu trabalho sobre a influência de alguns parâmetros nas distribuições cilíndrica e tangencial de fertilizante observaram que grãos maiores sofrem menos os efeitos das forças de resistência, saindo antes e com maior velocidade do disco. Também deduziram que palhetas com comprimentos menores podem resultar em velocidades de lançamento menores.

Grift et al. (2006) em sua medição de coeficiente de fricção pelo mesmo sensor óptico reportaram que para partículas de ureia de diâmetro médio de 3,85 mm com velocidade média de  $18,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e desvio padrão de  $1,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . O perfil de velocidades foi gaussiano, indicando também a tendência de partículas maiores atingirem maiores velocidades.

Villette et al. (2008) utilizaram um sistema de medição por imagens do lançamento de fertilizantes. Deduziram a velocidade de saída de um disco cônico, em uma formulação que pode ser aplicada para discos planos. Mediram experimentalmente o ângulo de saída,  $\theta_{\text{out}}$ , por meio de um sistema de imagens de longa exposição, onde as partículas iluminadas por holofotes deixam seus rastros marcados na imagem. A modelagem matemática das velocidades em função do ângulo de lançamento considerando um disco plano com um raio  $r_{\text{vane}}$ , com uma aleta reta de comprimento  $l_{\text{vane}}$ , montado a uma distância  $r_p$  fora do centro O, a um ângulo  $\alpha_{lv}$  (Figura 29).

Figura 29 – Vista superior de um disco em rotação e os componentes da velocidade de lançamento das partículas, identificando os ângulos e componentes necessários para a modelagem do fenômeno.



Fonte: VILLETTE et al., 2008.

A velocidade tangencial  $v_T$  pode ser escrita em função do ângulo de saída como:

$$v_T = \frac{v_R}{\tan \theta_{out}} = \frac{r_{vane} \hat{\theta}}{1 + \tan \theta_{out} \tan \alpha_{lv}} \quad (2)$$

onde  $v_R$  é a velocidade radial. A velocidade radial  $v_R$  é escrita conforme a equação (3).

$$v_R = \frac{r_{vane} \hat{\theta} \tan \theta_{out}}{1 + \tan \theta_{out} \tan \alpha_{lv}} \quad (3)$$

Finalmente, a velocidade horizontal resultante,  $v_H$ , é modelada pela equação (4).

$$v_H = \frac{v_R}{\sin \theta_{out}} = \frac{r_{vane} \hat{\theta}}{\cos \theta_{out} + \sin \theta_{out} \tan \alpha_{lv}} \quad (4)$$

Desta maneira, quanto maior a componente radial maior a velocidade final da partícula. Seus resultados levaram a dedução de que, pelo método utilizado, é possível aferir velocidades em função do ângulo de saída do sistema de imagens com precisão satisfatória, já que o maior desvio padrão medido foi de  $0,17^\circ$  resultando em uma mudança no local de aterrissagem de apenas 0,11 m. Também pontuam que o método possibilita prever o comportamento dinâmico

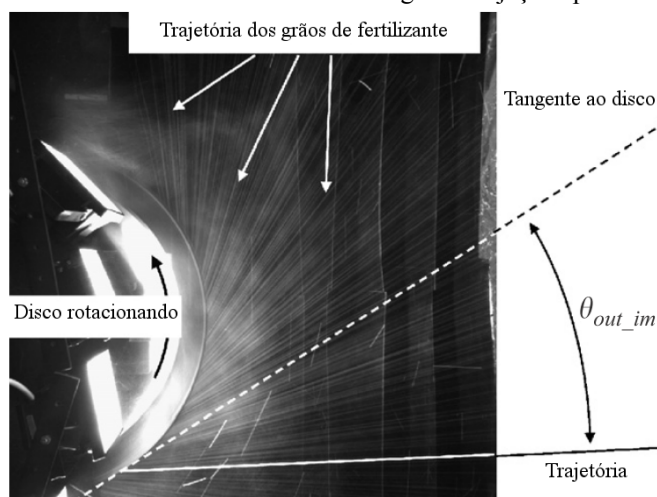
das palhetas sem fazer suposições sobre o coeficiente de fricção das partículas, o que exclui um dos maiores problemas na modelagem de distribuidores centrífugos.

Van Liedekerke et al. (2009) afirmam que em média as velocidades de saída são menores para o caso de fluxos de múltiplas partículas se comparado a análise de partículas únicas. Também, concluíram que além das velocidades dos grãos maiores serem maiores, a dispersão é mais controlada.

#### 2.4.2.5 Ângulo de ejeção

O ângulo de lançamento horizontal é medido em respeito à reta imaginária que tangencia o disco no ponto de ejeção do fertilizante, (Figura 30). Sua determinação é vital para a previsão do ponto de aterrissagem do fertilizante, e o padrão de distribuição resultante.

Figura 30 – Imagem com movimento borrado mostrando o ângulo de ejeção aparente.



Fonte: VILETTE et al., 2008.

Se o disco apresentar geometria cônica, com ângulo de inclinação, há o surgimento de outro ângulo, denominado ângulo de lançamento balístico. O fertilizante é impulsionado verticalmente por um componente vertical e sua trajetória alterada. Caso o disco seja plano, isto não ocorre e é assumido que todos os lançamentos ocorram no mesmo plano, conseqüentemente, o ângulo de lançamento balístico é igual a zero. Como definido na seção 1.1, os discos utilizados serão planos e, portanto, não serão revisadas geometrias e modelagens que se apliquem apenas a discos cônicos.



Villette et al. (2008) mensuraram os ângulos de ejeção e de lançamento balístico de partículas de fertilizante utilizando um sistema de imagens com movimento borrado. Posicionando uma câmera digital acima de um disco cônico distribuindo fertilizante foi possível registrar a trajetória das partículas e extrair os ângulos de ejeção corrigidos para as aberrações monocromáticas por um modelo matemático. Como os ângulos e velocidades são extraídos de processos experimentais o método não contém a complexidade e os erros associados à modelagem com coeficientes de fricção, provendo resultados mais rápidos e confiáveis.

Villette et al. (2013) em um trabalho subsequente utilizaram uma tela cilíndrica com uma banda de papel, envolvendo a parte frontal do disco que registra os impactos de dois fertilizantes, NPK e KCl. O ângulo de ejeção médio reportado diferiu para os fertilizantes de  $40,8^\circ$  para o NPK e  $37,7^\circ$  para KCl, indicando diferenças no regime friccional de lançamento em função do tipo de fertilizante. Como não foi especificada pelos autores, a causa pode ser apontada tanto pela forma e fluxo mássico das partículas, quanto pela própria fricção.

### **2.4.3 Trajetórias balísticas**

Após o fertilizante ser lançado do disco, a maior parte das interações de partícula-partícula cessam e entra em ação o regime de movimento balístico. As equações fundamentais do movimento neste caso são bem conhecidas e descritas e apesar da grande quantidade de grãos saindo do sistema ao mesmo tempo. Desde que se conheçam as características iniciais de arremesso pode-se prever o local de aterrissagem com precisão satisfatória.

#### **2.4.3.1 Translação das partículas**

O movimento de translação na trajetória balística é bem definido e discutido. No modelo cinemático tradicional utilizado, segundo Olieslagers et al. (1996), existe uma velocidade de lançamento representando a energia adquirida pela rotação do disco, e duas forças de resistência, perda de energia por forças da gravidade e arrasto aerodinâmico. Destas formas de perda de energia, apenas o arrasto aerodinâmico é uma variável de definição complicada pelos vários fenômenos em ação durante o voo.

Hofstee e Huisman (1990), em seu estudo sobre propriedades de fertilizantes fizeram menção ao arrasto aerodinâmico sofrido pela partícula. Os autores determinam que, com base

na literatura, a resistência aerodinâmica é função da forma da partícula representada pelo coeficiente de arrasto, e do número de Reynolds. Desta forma, cada grupo de partículas com o mesmo número de peneira, ou diâmetro, têm uma velocidade terminal e uma posição igual. Adicionam que apesar do assunto não ser complexo como a fricção, raramente são realizados estudos experimentais sobre o tema, e quando são feitos são de partículas únicas.

Hofstee (1994) modelou matematicamente e mensurou as velocidades de ejeção das partículas por um medidor ultrassônico de mudança de frequência. Desta forma, é possível determinar as variáveis de entrada para a simulação das trajetórias balísticas de forma confiável e rápida já que o sensor não necessita de calibração e mede diretamente a velocidade.

Reumers et al. (2003b), na busca de alternativas a testes de padrão de distribuição calcularam o voo balístico de uma série de partículas com diâmetros e locais de lançamento diferentes, obtidos experimentalmente por ensaios com distribuições cilíndricas. As distribuições calculadas foram precisas o suficiente se comparados aos testes tradicionais e que é possível tirar conclusões corretas sobre a influência de parâmetros nos locais de aterrissagem.

Cointault et al. (2003) mediram as velocidades e ângulos de lançamento de fertilizante por um método de imagem de múltiplas exposições. Os dados podem ser utilizados como parâmetros de entrada para modelos balísticos que sejam capazes de prever e corrigir as características de distribuição com taxa variável. Os autores inferiram que o processo é preciso o suficiente para aproximar as condições reais de funcionamento.

Hijazi et al. (2010) complementam os experimentos de Cointault et al. (2003) empregando LEDs estroboscópicos com uma câmera digital de maior resolução. As mudanças aplicadas no sistema aumentam a precisão e diminuem os custos na aplicação no campo.

Coetzee e Lombard (2011) em sua investigação por simulações DEM, tiveram o modelo balístico acoplado com os resultados do método. Comparado com experimentos de validação o sistema computacional pode prever os padrões de distribuição para baixas velocidades de rotação com acerto aceitável.

#### **2.4.3.2 Rotação das partículas**

A translação das partículas em trajetória balística foi descrita satisfatoriamente na literatura, mas poucas investigações foram realizadas sobre a influência da rotação da

partícula sobre seu próprio eixo no perfil de distribuição. A maioria dos modelos balísticos incorporados em simulações e previsões assumem que as partículas sofram apenas escorregamento e colisões frontais.

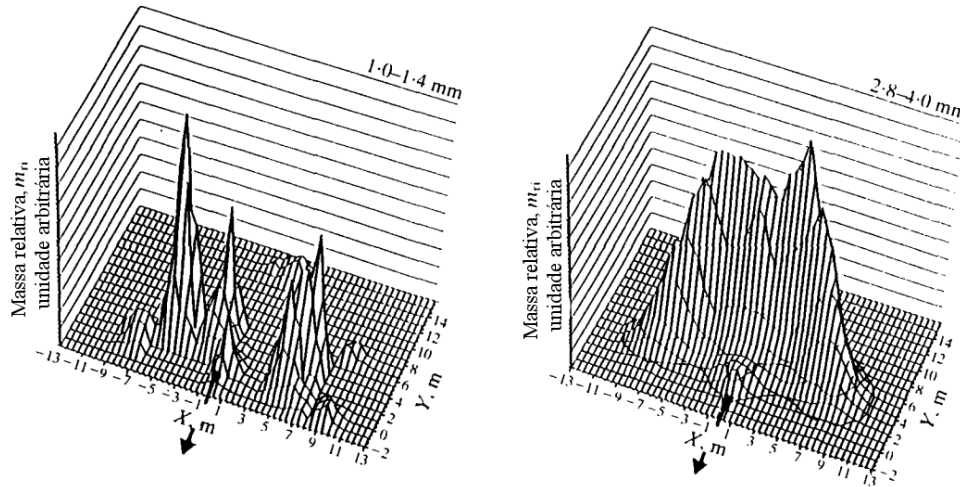
Cool et al. (2014) investigaram a influência da rotação das partículas na trajetória balística do fertilizante por simulações numéricas. O modelamento do grão no disco cônico foi analítico de partícula única. Na inserção dos efeitos da rotação durante o lançamento balístico, principalmente o efeito Magnus, que é a combinação da translação com a rotação no arrasto aerodinâmico. Ocorre uma diferença de forças que leva a uma deflexão da trajetória. Os autores concluíram que o efeito é significativo e não pode ser ignorado.

#### **2.4.3.3 Local de deposição**

Após todo o processo de aceleração, interações, lançamento e trajetória, o fertilizante se deposita no solo. O local deve ser próximo o suficiente da planta para seus nutrientes serem devidamente aproveitados e a quantidade deve ser correta para não ocorrer desperdício nem contaminação ambiental. Como será visto nos próximos parágrafos, o padrão de distribuição é um reflexo de todo o caminho da partícula, o resultado de todo o equipamento em conjunto, e é nele que é ponderado o desempenho de toda a máquina e processo.

Pettersen et al. (1991) ao estudarem a influência do tamanho das partículas no padrão de distribuição concluiu que as partículas têm locais de distribuições distintos conforme seu diâmetro. Grãos pequenos se concentram ao lado do distribuidor, enquanto grãos maiores são lançados mais longe e contribuem para alargar o padrão (Figura 31).

Figura 31 - Distribuição espacial de massa para duas classes de partículas. Grãos menores ficaram mais próximos enquanto grãos maiores foram lançados mais longe.



Fonte: PETTERSEN et al., 1991.

Olieslagers et al. (1996) calcularam o padrão de distribuição por métodos computacionais via modelos analíticos de partícula única. Foram simulados vários diâmetros de grãos para resultar no padrão de distribuição estacionário.

Reumers et al. (2003b) utilizaram dados de distribuição cilíndrica e modelos balísticos para prever locais e padrões de deposição. Seus resultados apontaram semelhanças significativas na quantidade e local de aterrisagem do fertilizante, o suficiente para concluir a influência de alguns parâmetros.

Coetzee e Lombard (2011), no modelamento por DEM de um distribuidor centrífugo com defletores para fertilizantes granulares, verificaram computacionalmente e por experimentos que os padrões podem ser modificados pela inserção de direcionadores. Também realizaram estudos sobre alguns parâmetros que seriam impraticáveis de serem determinados apenas experimentalmente, examinando sua influência no padrão de distribuição final e comparando com dados de campo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

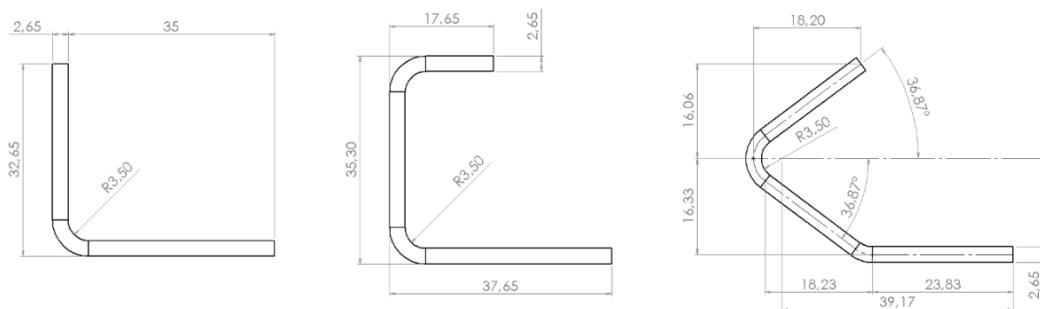
#### 3.1 Hipótese

Conforme as observações realizadas na literatura, resumidas na seção 2.3.4.6, foi conjecturado que existe influência significativa da seção transversal das palhetas nas componentes de forças de fricção as quais as partículas são submetidas, dependente do formato geométrico utilizado. Como estas forças tem ligação com as propriedades de saída, explanadas nas seções 2.4.2.4 e 2.4.2.5, para o teste da hipótese foi inferido o ângulo de ejeção e coeficiente de variação antes da entrada em uma trajetória balística. A variabilidade também é um indicativo de que houve uma reorganização dos grãos pelas perdas de quantidade de movimento. Qualquer modificação destas variáveis significa uma alteração do padrão final de distribuição. Ao potencialmente introduzir perdas no sistema, diferentes desenhos transversais podem organizar e controlar o perfil de distribuição de fertilizante.

#### 3.2 Planejamento Experimental

Um experimento foi realizado em condições controladas para determinar se a hipótese levantada é válida. Por razões práticas, não é possível medir diretamente estas forças, apenas sua influência em uma das variáveis dependentes, o ângulo de saída. Portanto, neste ensaio o objetivo foi obter o ângulo de ejeção dos grãos para diferentes perfis transversais de palheta. Também foi sondada sua relação com a velocidade de rotação do sistema, já que é um parâmetro comumente utilizado para descrição da distribuição.

Figura 32 – Perfil transversal de palheta L, C e V.



Fonte: Autor.

Para o planejamento experimental, foram elencados dois fatores: perfis transversais de palheta e rotação do disco. O primeiro possui três níveis: L, C e V (Figura 32). A escolha destes perfis teve o objetivo de introduzir uma referência (C), uma pequena variação (L) e uma geometria diferente (V). Quanto a velocidade de rotação, foram escolhidas as mais utilizadas, 540 e 810 rpm. A Tabela 1 detalha os fatores envolvidos no experimento.

Tabela 1 - Detalhamento dos fatores envolvidos no experimento.

Fator	Níveis			Tipo
Perfil transversal	L	C	V	Qualitativo
Rotação	540 rpm	810 rpm		Quantitativo

Fonte: Autor.

Como era necessário obter o ângulo de ejeção, esta seria a variável resposta. Mas infelizmente ela não pode ser encontrada diretamente pelo experimento. Seus dados estão embutidos nas imagens que devem ser adquiridas. Assim, a variável resposta foi o conjunto de imagens adquirida para dadas propriedades de máquina, em triplicata. A aquisição dos dados foi feita por meio de um método fotográfico de longas exposições com auxílio de iluminação contínua, elaborado por Villette et al. (2008). O delineamento para este experimento foi escolhido como fatorial inteiramente casualizado 3 x 2.

O aparato experimental estacionário, responsável pela distribuição, foi adaptado de Villette et al. (2008), contendo um reservatório, controle de vazão contínua, posicionamento do local de deposição no disco e controle de rotação. O sistema de aquisição de imagens, responsável pelas fotografias, contém um conjunto de três holofotes, uma câmera fotográfica DSLR equipada com controle remoto e controle manual, além de uma cabeça de tripé para posicionamento correto do plano do sensor de imagem paralelamente ao disco. Alguns pré-testes foram realizados para determinar as variáveis fotográficas a serem utilizadas nos testes: distância focal de 32 mm, tempo de exposição de 0,05 s, sensibilidade fotossensível ISO em 200 e para uma rotação de 540 rpm a uma abertura de f/8 enquanto que para 810 rpm a abertura foi de f/10. Finalmente foi definido um material particulado para distribuição, por ter natureza granular e proximidade morfológica à maioria dos fertilizantes além de baixa higroscopia. O detalhamento destas partes é realizado na seção 3.3 e 3.4. A análise dos dados presentes nas imagens foi manual. Destas fotografias, foram identificadas as componentes

descritas na Figura 30: trajetória, semicírculo do conjunto e tangente. O semicírculo do disco foi traçado por métodos gráficos, as trajetórias mais claras foram retraçadas e estendidas até atingir o semicírculo, a tangente do ponto foi obtida e o ângulo entre a trajetória e a tangente foi mensurada. Após o levantamento dos dados levantados nas fotografias, foi aplicado uma série de análises de variância para inferir se houveram mudanças significativas ou não.

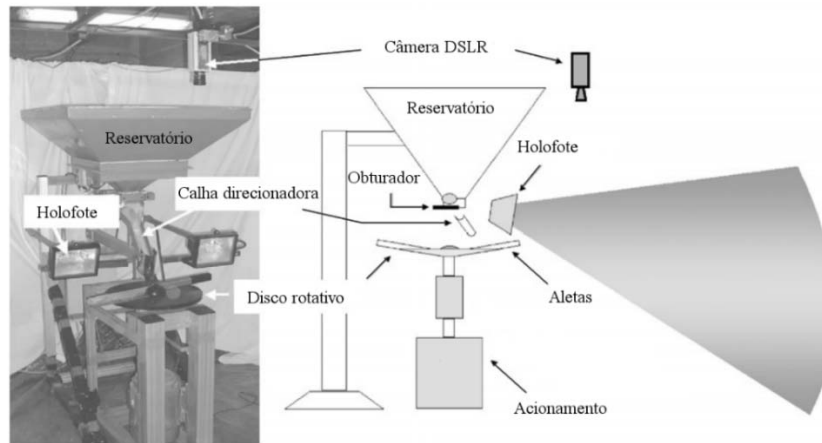
O único controle que não pode ser mantido foi a vazão mássica. Devido as peculiaridades do método fotográfico com a configuração e local de ensaio foi necessário o ajuste da vazão em função da rotação aplicada. Para 540 rpm foi encontrada a vazão de 0,108 kg/s, enquanto que 810 rpm o valor subiu para 0,152 kg/s.

### **3.3 Aparato experimental**

O método de aquisição dos dados do experimento foi adaptado de Villette et al. (2008), já descrito anteriormente no texto. O funcionamento se resume a realizar a distribuição de material granular em um ambiente controlado com baixa luminosidade. Enquanto a distribuição ocorre, um conjunto de aquisição de imagens realiza uma exposição de longa duração. Um grupo de holofotes cuidadosamente posicionados ilumina a trajetória das partículas, as destacando do fundo escuro. Durante o processo todo equipamento deve permanecer parado, pois as vibrações do funcionamento do disco não podem ser transferidas para o sistema de imagem.

O propósito do aparato experimental, adaptado de Villette et al. (2008) (Figura 33), é de realizar as três funções primordiais: distribuir o material granulado contendo as principais variáveis, controlar as exposições fotográficas e adquirir as imagens.

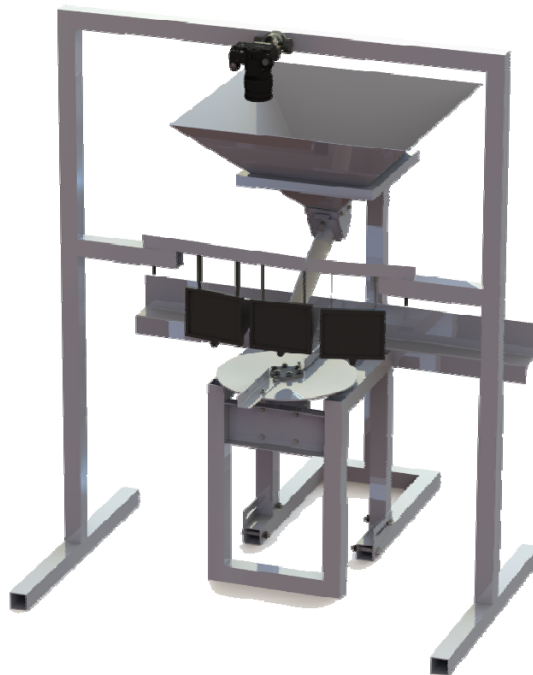
Figura 33 – Arranjo experimental para obtenção de imagens de movimento borrado.



Fonte: VILLETTE et al., 2008.

O equipamento (Figura 34) foi projetado para funcionar de modo estacionário, não conectado a nenhum veículo. São três sistemas distintos e modulares que compõem todo o aparato, com quase sua totalidade de componentes manufaturadas de aço. Qualquer conjunto pode ser prontamente substituído desde que se conforme com as medidas gerais de encaixe no conjunto.

Figura 34 - Aparato experimental projetado para o estudo.

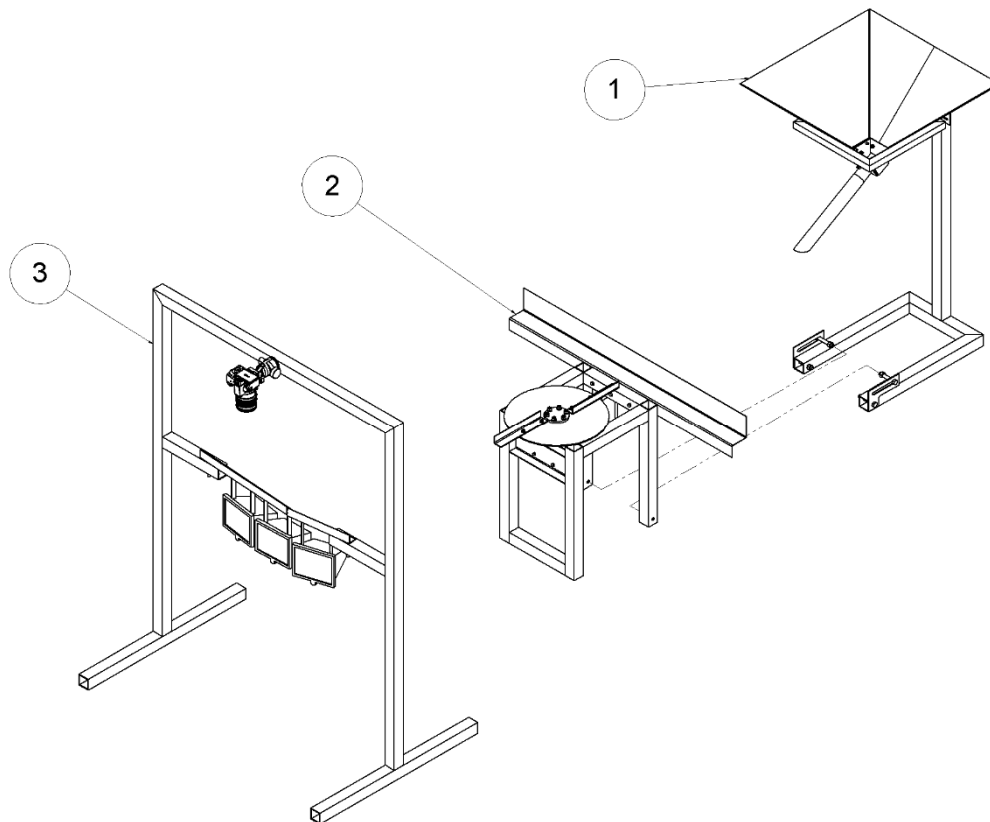


Fonte: Autor



Cada grupo (Figura 35) tem sua função definida. O conjunto (1) recebe, dosa e direciona de forma contínua o material granular. Após, o conjunto (2) coleta, acelera e arremessa as partículas. Enquanto isso, o conjunto (3) destaca e registra as trajetórias para a análise.

Figura 35 – Sistemas que compõem o aparato experimental. (1) reservatório com dosador e estrutura de suporte. (2) motor com inversor e conjunto do disco e (3) cavalete com o sistema de imagem e iluminação



Fonte: Autor.

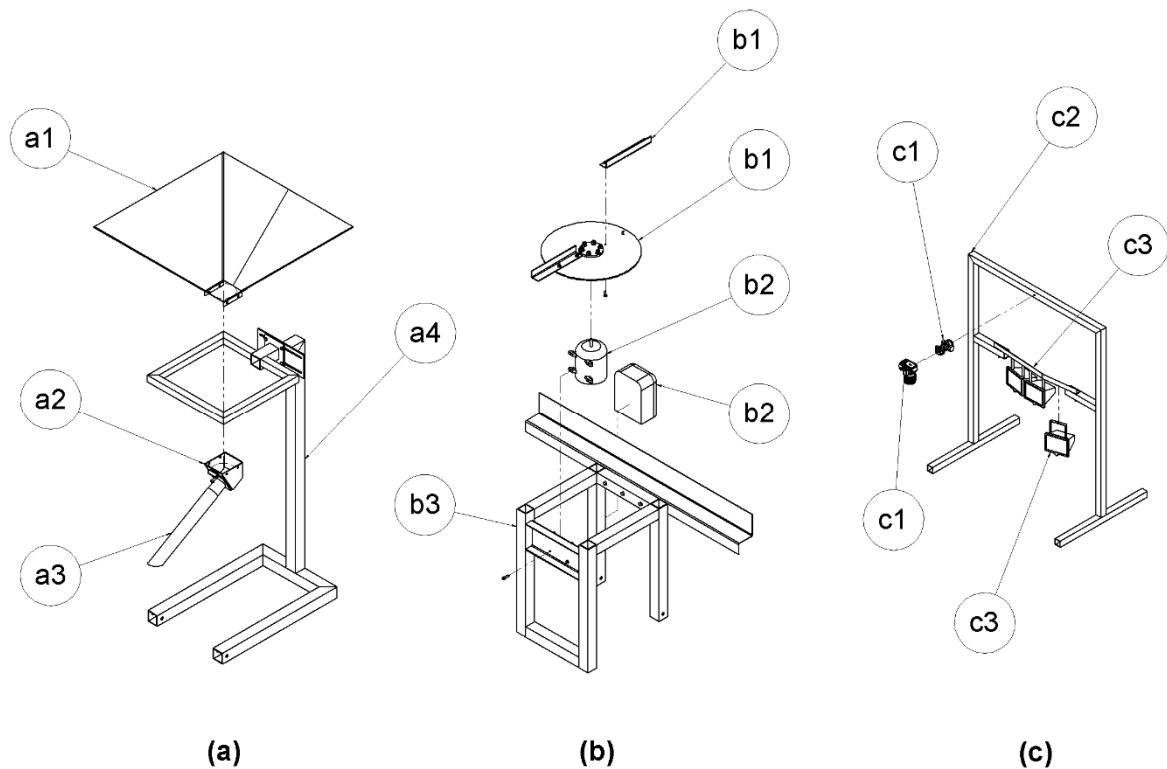
O sistema 1 (a) (Figura 36) possui um reservatório tronco piramidal (a1) de chapas finas de aço com capacidade máxima de  $0,06 \text{ m}^3$  que termina em um conjunto obturador corredeira (a2) com ajuste de abertura, levando a um tubo direcionador (a3) de PVC. A estrutura de suporte (a4) também detém os ajustes de local de deposição além de prover uma plataforma para adição de peso, mitigando as vibrações geradas pelo funcionamento.

O sistema 2 (b) compreende uma subestrutura (b3) de suporte ao motor (b2), WEG com  $0,33 \text{ kW}$  de potência, voltagem de  $220/380 \text{ V}$ , amperagem de  $1,47/0,851 \text{ A}$  e rotação

nominal de 1710 rpm com inversor de frequência (b2) para controle da rotação. A utilização do inversor provê uma grande gama de rotações, desde cerca de 50 rpm até 1710 rpm. O disco (b1), montado imediatamente acima do motor elétrico, tem as palhetas fixadas por parafusos, proporcionando uma troca rápida, ambos de aço sem revestimento superficial. Seu desenho, juntamente com as palhetas e o conjunto montado estão detalhados no Apêndice A.1 ao A.3.

O sistema 3 (c), que não possui contato com o resto do equipamento, provê suporte a uma câmera (c1) DSLR modelo Canon EOS Rebel T3, montada diretamente em uma cabeça de tripé (c1) tipo *ballhead* acoplado a um disparador remoto. Logo abaixo em uma estrutura de esporte (c2) se encontram três holofotes halógenos (c3) de 300W cada, com posição ajustável..

Figura 36 - Detalhamento dos componentes do (a) sistema: (a1) reservatório, (a2) dosador, (a3) direcionador e (a4) estrutura. No (b) sistema 2: (b1) palhetas e disco, (b2) motor e inversor, (b3) estrutura de suporte. No (c) sistema 3: (c1) câmera e cabeça de tripé, (c2) estrutura, (c3) holofotes e posicionamento ajustável.



Fonte: Autor.

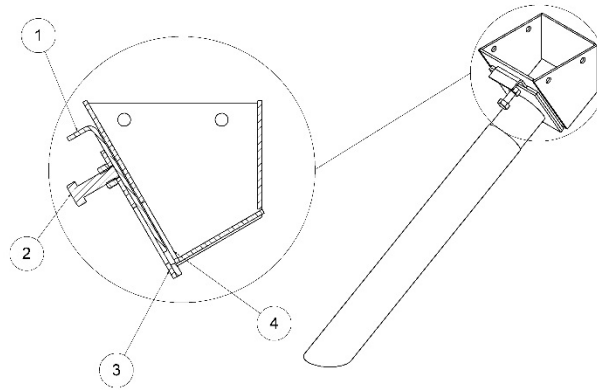
Para a realização do experimento, alguns controles tiveram que ser implementados. No total, três controles distintos: vazão, posição e rotação. O controle de vazão (Figura 37) está localizado no primeiro sistema, é do tipo obturador correção com regulagem contínua de

posição. Sua vazão mássica,  $\dot{m}_g$ , obedece a relação empírica exposta da equação (8) com a abertura do dosador,  $l_e$ :

$$\dot{m}_g = 0,1438 \times \ln(l_e) - 0,3791 \quad (8)$$

sendo válida no intervalo de [0;40] mm.

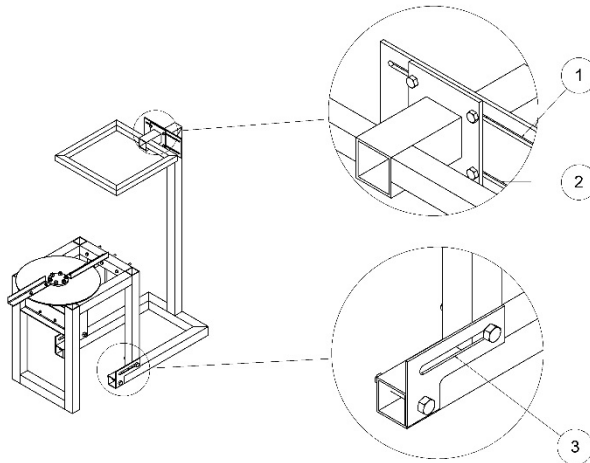
Figura 37 - Detalhes do conjunto obturador para controle da vazão mássica. (1) placa obturadora, (2) parafuso de fixação, (3 e 4) placas de suporte.



Fonte: Autor.

Os controles de posição (Figura 38) estão localizados em dois pontos distintos: a posição lateral, está no suporte do reservatório (1 e 2). A profundidade, está no apoio do sistema de discos com a estrutura do equipamento (3). Ambas possuem fixações para garantir o travamento na posição desejada. A altura relativa dos discos ao solo não possui nenhuma regulagem.

Figura 38 - Controles de posição do local de deposição no disco. (1 e 2) canais de posicionamento longitudinal. (3) canal de posicionamento de profundidade.



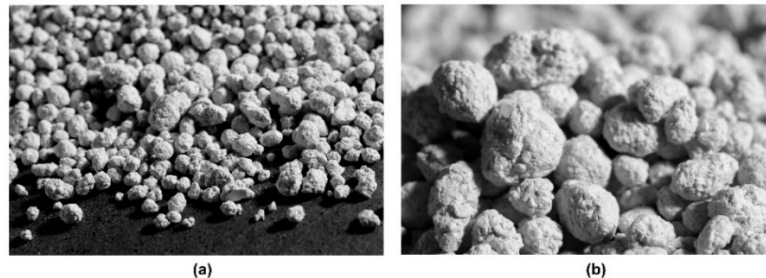
Fonte: Autor.

A rotação foi controlada por um inversor de frequência e as rotações escolhidas foram monitoradas por meio de um tacômetro.

### 3.4 Caracterização do material granular

O meio particulado escolhido (Figura 39) para a realização dos experimentos foi o carbonato de cálcio granular ( $\text{CaCO}_3$ ), conhecido como calcário de conchas marinhas, principalmente por sua estabilidade química e baixa higroscopia, permitindo a realização dos experimentos mesmo em dias úmidos. Sua aparência é predominantemente esférica com alguns desvios excêntricos e poucas partículas quebradas.

Figura 39 - Grãos de carbonato de cálcio granular (a) em uma pilha e (b) em detalhes.

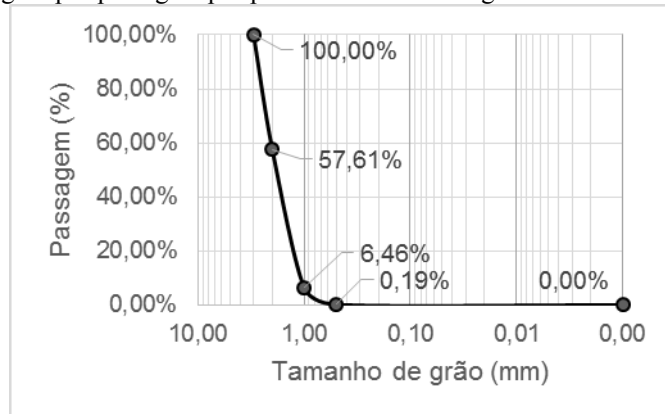


Fonte: Autor.

Para caracterizar fisicamente o meio granular são necessárias pelo menos duas propriedades: diâmetro médio da partícula e ângulo de repouso. O diâmetro médio ponderado

das partículas foi obtido via ensaio de peneiramento horizontal com agitador mecânico, utilizado peneiras de 4,00 mm; 3,00 mm; 2,00 mm; 1,00mm e 0,50 mm. A massa retida em cada peneira foi pesada e, em seguida, calculado o percentual passante. O ensaio resultou na representação gráfica (Figura 40) da passagem de grãos relacionada ao tamanho de grão máximo para cada peneira.

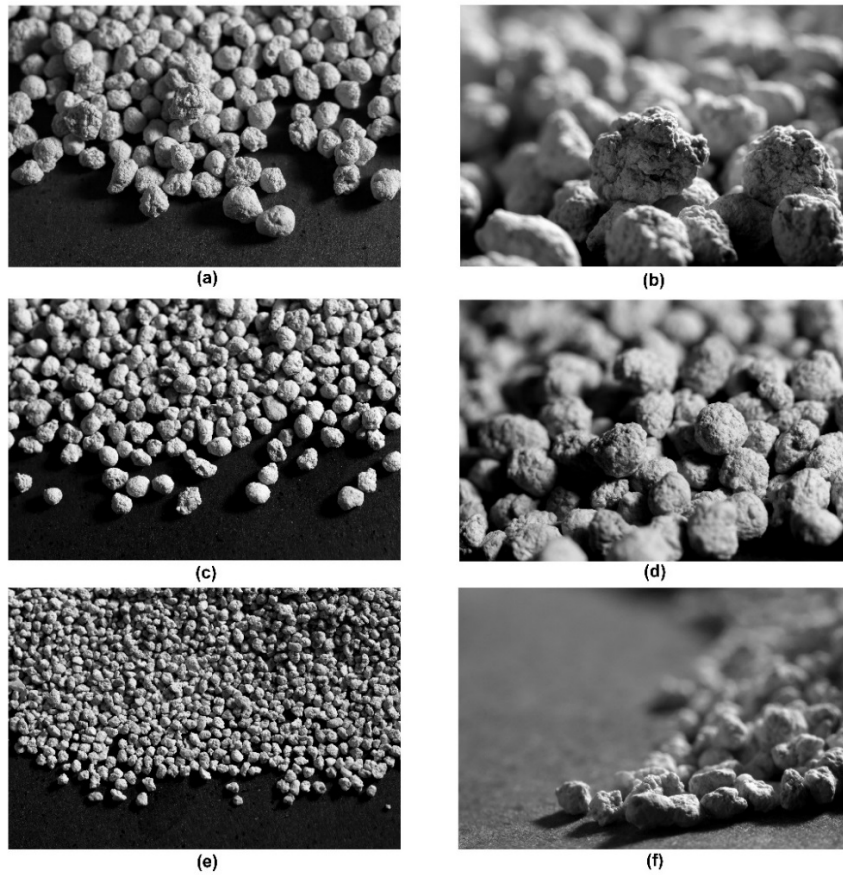
Figura 40 - Tamanho de grão por passagem por peneira em ensaio de granulometria.



Fonte: Autor.

Com os dados da Figura 40 foi possível determinar o diâmetro mediano de 1,87 mm com desvio padrão de 1,07 mm. A Figura 41 ilustra os tamanhos de grão retidos para cada tamanho de peneira.

Figura 41 - Grãos de carbonato de cálcio granular para peneira de (a) 2 mm em uma pilha e (b) em detalhes, (c) 1 mm em uma pilha e (d) em detalhes, (e) 0,5 mm em uma pilha e (f) em detalhes.



Fonte: Autor.

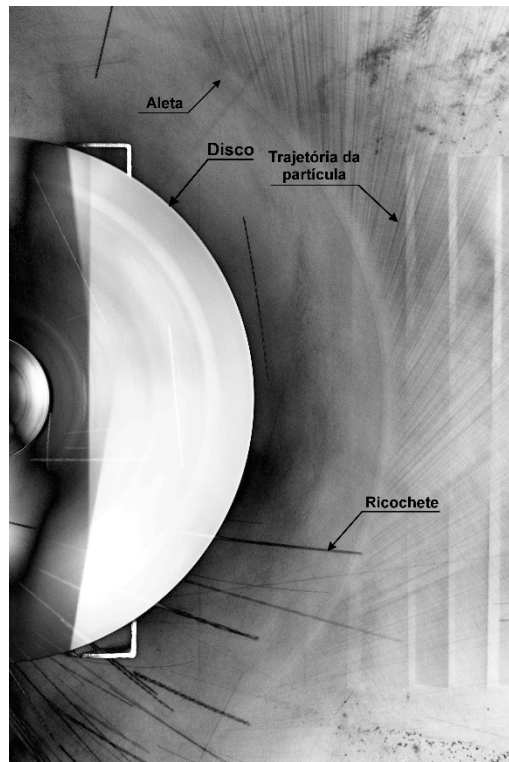
Já o ângulo de repouso estático foi determinado pelo ensaio de caixa inclinada, que determinou um valor de aproximadamente  $36^\circ$ . O ângulo de fricção estática entre o calcário granular e o aço foi determinado por um simples teste com um plano inclinado em triplicata, com um valor médio de  $25,36^\circ \pm 3,33^\circ$ , o que significa que o coeficiente de fricção estático,  $\mu_s$ , é de  $0,47 \pm 0,09$  com 95% de confiança. A massa específica da pilha,  $\rho$ , medida foi de  $1259,3361 \pm 27,3311 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  com 95% de confiança. Em condições normais de transporte e manuseio, o meio granular não apresentou quebras de grão em grande quantidade ou qualquer indício de fragilidade. Exibiu uma tendência moderada de decomposição em pó quando submetido a maiores esforços.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Propriedades de lançamento das partículas

No total foram extraídas 861 trajetórias de todas as fotografias, 298 da palheta C, 277 da palheta L e 286 da palheta V. A Figura 42 é uma das exposições fotográficas de movimento borrado que foram obtidas durante o experimento. Os ricochetes são partículas de fertilizante que não foram apanhadas pela aleta e acabaram por atingir alguma outra superfície tendo sua velocidade diminuída.

Figura 42 - Exposição fotográfica de movimento borrado com valores invertidos para auxiliar a visualização. Estão destacadas as principais componentes da fotografia: o disco, a palheta, a trajetória da partícula e os ricochetes.



Fonte: Autor.

Nota-se que as trajetórias ficam moderadamente destacadas do fundo pela presença dos holofotes, mas também apresentam uma quantidade elevada de pó em suspensão. Parte deste material é proveniente do ambiente onde os testes foram conduzidos, mas a maior parcela é advinda da decomposição do material quando é atingido pela palheta, como mostra a Figura 47. A presença do pó em suspensão prejudicou a aquisição dos dados das fotografias, pois não

oferecia contraste suficiente para a distinção da trajetória do ambiente. Antes da extração manual, as exposições digitais em formato CR2 16 bits tiveram suas aberrações ópticas corrigidas por meio de um algoritmo comercial, processado pelo software Adobe Lightroom 5.7 e exportadas como JPEG 8 bits para extração.

Para realizar a análise dos dados colhidos foi utilizada a ferramenta estatística ANOVA. Durante o experimento, cada palheta foi relacionada com a rotação e vazão mássica. Como ambas são alteradas em conjunto, apenas um dos parâmetros pode ser considerado uma variável ao mesmo tempo. Combinações de interações como rotação x vazão mássica ou rotação x ângulo x vazão mássica não trazem nenhuma informação adicional e não foram realizadas. O nível de significância mínimo escolhido foi de 5% para todas as análises. Pelo número de trajetórias relativamente elevado, foi utilizado o software SISVAR para auxiliar a análise estatística.

Uma análise descritiva preliminar foi realizada (Tabela 2) para extrair uma representação média dos dados colhidos em relação ao ângulo de saída.

Tabela 2 - Análise descritiva do ângulo de saída médio.

	Média Aritmética	Desvio padrão	Erro padrão	Intervalo de confiança 95%		Variância
				Limite Mínimo	Limite Máximo	
$\theta_{out}$	31,3927	3,6483	0,1243	27,7444	35,0410	13,3098

Fonte: Autor.

Partido desta análise preliminar uma ANOVA foi aplicada (Tabela 3) verificando a existência de uma diferença significativa entre os fatores de variação e a variável resposta (ângulo de saída).

Tabela 3 - Resumo da aplicação da ANOVA para os dados gerais.

Fatores de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdad e	Quadrados Médios	F	F <sub>crítico</sub>	P(F≤Fc)
Palheta (A)	4447,6804	2	2223,8402	272,628	3,0062	0,0000
Rotação/Vazão Mássica (RVM)	33,3181	1	33,3181	4,115	3,8523	0,0428
A x RVM	42,6462	2	21,3231	2,634	3,0062	0,0724
Resíduo	6922,7864	855	8,0968			
Total	11446,4311	860				

Fonte: Autor.



O primeiro fator, a aleta, mostrou que a 5% de significância há uma grande diferença entre seus níveis. Da mesma maneira, a dupla de variáveis Rotação/Vazão Mássica apontou para uma diferença entre seus dois níveis. Já a interação entre R/VM x Aleta, de uma forma geral não apresentou nenhuma diferença nos resultados em relação a seus níveis. Todos estes fatores e suas interações serão analisados mais profundamente nas próximas seções.

Para os resultados generalizados por aleta, a aplicação da ANOVA trouxe os resultados da Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados da análise de variância para as três palhetas ensaiadas em relação ao seu ângulo de saída médio.

Tratamentos	Médias (°)	Resultados	
V	28,1705	a	
C	33,0445		b
L	33,9423		b
DMS		0,5581	

Fonte: Autor.

Comparando os ângulos das palhetas (Tabela 4), a diferença entre seus níveis fica clara. Enquanto a aleta V teve o menor resultado de todos (28,1705°), ambos os perfis C e L demonstraram resultados médios bem próximos (33,0445° e 33,9423°, respectivamente). A ANOVA apresentou que apenas a aleta V trouxe diferenças significativas se comparada com ambas as aletas. Isto pode ser explicado ao verificar (Figura 25), que o perfil V é capaz de impor duas componentes da força de fricção simultaneamente, ao capturar as partículas no vértice central. Combinando isto com uma breve análise da equação (1), onde apenas as forças de fricção ( $\mu_v$  e  $\mu_d$ ) não possuem valores fixados no experimento (são variáveis flutuantes), é possível afirmar que esta diferença é causada pela introdução de perdas adicionais pela ação das forças de fricção ligadas a forma geométrica do perfil da palheta.

Para descrever os resultados na forma da velocidade de saída, a equação (4) que a relaciona com o ângulo de saída precisa ser adaptada ao caso de um disco com palhetas alinhadas radialmente. Nesta montagem, a variável  $\alpha_v$  é considerada igual a zero, sua tangente também se iguala a zero. A equação (4) pode ser escrita como a equação (9).

$$v_n = \frac{v_{\text{base}} \theta}{\cos \theta_{\text{out}}} \quad (9)$$

Para o cálculo da velocidade, é necessário que o raio de palheta e velocidade angular sejam discriminados para todos os perfis. Como está sendo utilizado um valor médio, a melhor aproximação é também aplicar um valor médio para a rotação, entre 540 rpm e 810 rpm. A Tabela 5 relaciona todas as constantes mencionadas neste parágrafo com suas grandezas.

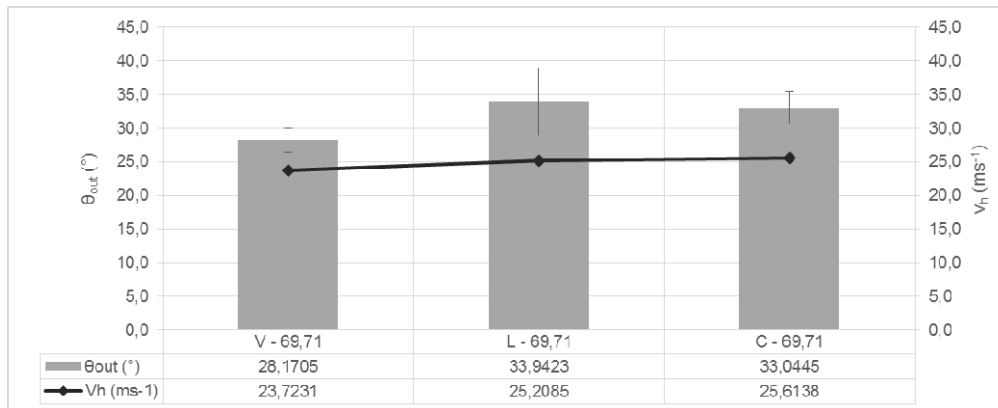
Tabela 5 - Constantes aplicadas durante o experimento.

$r_{\text{vaneL}}$ (mm)	300
$r_{\text{vaneC}}$ (mm)	308
$r_{\text{vaneV}}$ (mm)	300
$\theta_{540}$ ( $s^{-1}$ )	54,55
$\theta_{810}$ ( $s^{-1}$ )	84,86

Fonte: Autor.

Ao aplicar a equação (4) com as constantes da Tabela 5, são obtidos os valores da velocidade média para cada caso. A Figura 43 exhibe, por conveniência, o ângulo e a velocidade média geral.

Figura 43- Ângulo de saída ( $\theta_{\text{out}}$ ) representado pelas barras com barras de erro de 2 desvios padrões, 95% da curva normal, relacionados com a velocidade de ejeção ( $v_h$ ) para cada palheta segundo seu valor médio de rotação.



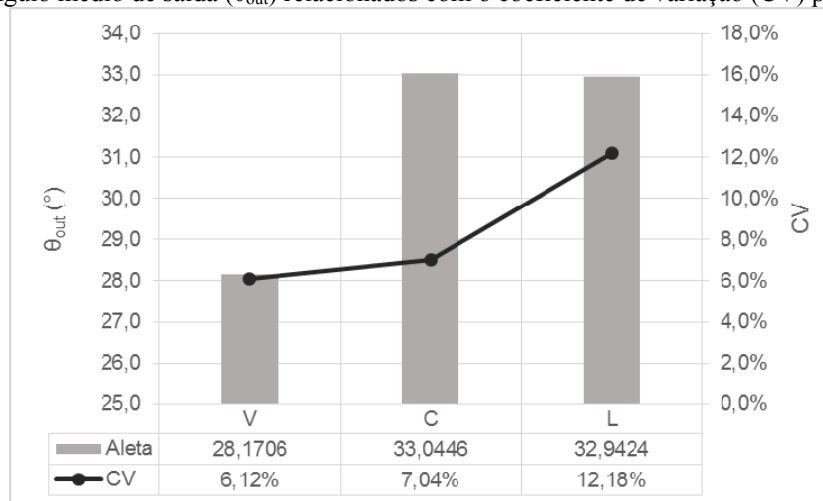
Fonte: Autor.

Novamente, o resultado do ângulo de saída médio se repete, já que nenhuma nova variável foi inserida e as constantes não possuem muita diferença entre si. A palheta V apresenta a menor velocidade média, enquanto ambas C e L, não sendo estatisticamente diferentes, ficam próximas com os maiores valores.

## 4.2 Uniformidade das propriedades de lançamento

O coeficiente de variação aplicado ao ângulo de saída dos perfis de aleta é um importante indicativo dos efeitos das forças de resistência, pois aponta a uniformidade para cada geometria. Menores valores comunicam maior constância. A Figura 44 exibe a classificação em ordem crescente de CV, juntamente com o ângulo médio geral de cada palheta.

Figura 44 - Ângulo médio de saída ( $\theta_{out}$ ) relacionados com o coeficiente de variação (CV) para cada palheta.



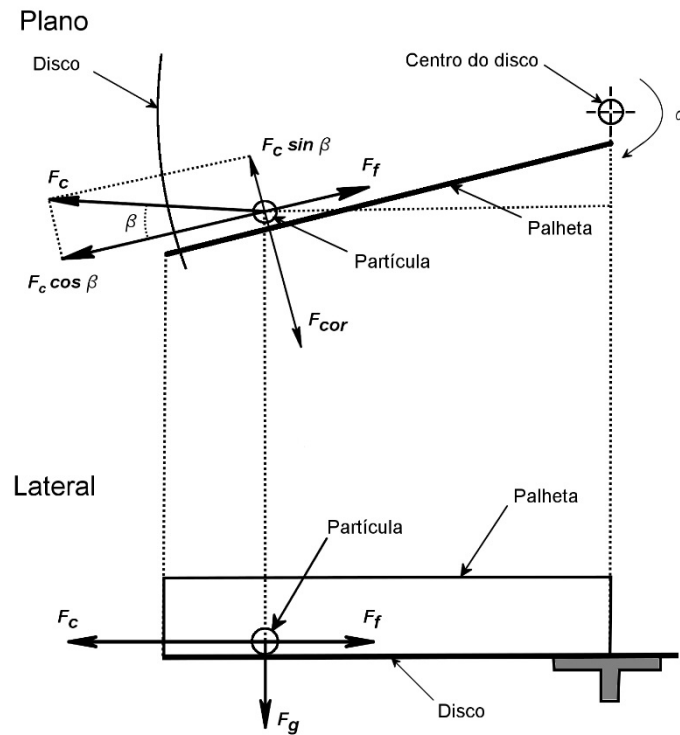
Fonte: Autor.

O desenho V exibiu os menores valores, seguido do C com apenas 0,92% de diferença. Em último, a palheta L com coeficiente 6,06% superior à primeira.

Ao analisar os resultados provenientes do ângulo e velocidade de ejeção é inequívoco afirmar que a diferença só ocorre quando há uma mudança significativa na geometria transversal. Segundo o modelo analítico, exposto na seção 2.4.2, equação (1), existem duas forças principais que atuam no balanço geral: centrífuga e fricção. A primeira é responsável por impulsionar a partícula, enquanto a segunda representa as componentes de resistência ao movimento. Uma forma simplificada da equação (1) pode ser escrita como a equação (10), adaptada de Olieslagers et al. (1996), apoiada pelo esquema da Figura 46, um somatório para determinação da força de inércia,  $F$ , partículas sem múltiplas interações.

$$F = F_c - F_f \quad (10)$$

Figura 45 - Forças esquematizadas agindo numa partícula em um rotor plano com palhetas retas.



Fonte: Adaptado de OLIESLAGERS et al. (1996).

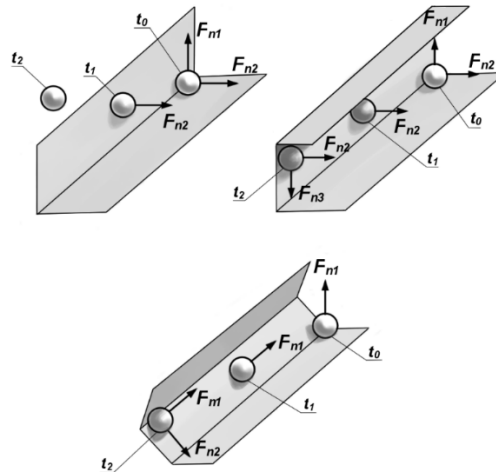
Desenvolvendo a força de fricção e força centrífuga para o disco plano e com palhetas montadas radialmente ( $\alpha_V=0$ ) nas suas componentes relativas à força gravitacional  $F_g$ , centrífuga,  $F_c$  e Coriolis,  $F_{cor}$ , além de adicionar o coeficiente de fricção correspondente com sua reação a palheta,  $\mu_v$ , ou no disco,  $\mu_d$ , que irá resultar na equação (11).

$$F = F_c - F_g \mu_d - F_{cor} \mu_v \quad (11)$$

Os únicos membros da força de fricção neste caso, como mostra a equação (11), são as forças gravitacionais e de Coriolis. Apenas o segundo termo mantém os grãos em contato com o perfil transversal no disco, já que a fricção responde apenas a componentes ortogonais à superfície nos pontos de contato. Assim é possível apontar que, segundo o modelo analítico apoiado pelos dados deste experimento, a força de fricção entre a partícula e a palheta é dependente de seu perfil transversal e causou componentes de resistência adicionais que afetaram as propriedades de lançamento. Experimentalmente isso pode ser observado nos menores ângulos e velocidades da palheta  $V$ , disponíveis na Tabela 4, que devido a sua

geometria pode impor componentes extras de fricção, Figura 46, se comparado aos outros perfis ensaiados.

Figura 46 - Vista de uma partícula interagindo com um perfil L (*esquerda acima*), C (*direita acima*) e V (*abaixo*), mostrando as forças normais  $F_{n1}$ ,  $F_{n2}$  e  $F_{n3}$  que causam as forças de fricção se desenvolvendo de  $t_0$  a  $t_2$ .



Fonte: Autor.

A uniformidade destes perfis reforça e complementa o resultado. O menor coeficiente de variação da geometria V indica que as componentes adicionais da força de fricção foram capazes de organizar e conter as partículas, uniformizando a velocidade e o fluxo de material granular até a saída do disco. Como a palheta C apresentou coeficientes próximos, isto aponta que a contenção das partículas de fertilizante como agente principal na grande diferença de CV de ambas para a geometria L. Evidentemente, pela falta de ambos os fenômenos, a seção L acaba expelindo algumas partículas antes do final da palheta. Enquanto isso, ao não impor as mesmas forças de contenção e resistência, é capaz de propeler os grãos que estão contidos na sua parte inferior a ângulos e velocidades maiores. Esta diferença de comportamento é dependente do local onde o grão se acomoda combinado com o fato de que as partículas tendem a subir na palheta para velocidades angulares relativamente grandes, como está exposto na Figura 47. As reações da massa de grãos também podem ser vistas nos estudos de Villette et al. (2013) e Kweon et al. (2007). Isto pode justificar o elevado CV e complementar a compreensão das causas para os grandes ângulos das palhetas em L.

Figura 47 - Fotografia exibindo as partículas (a) ascendendo na palheta durante sua saída do disco e (b) expelindo pó após o impacto final com a palheta.



Fonte: Autor.

### 4.3 Efeitos da rotação e vazão mássica

Aplicando a análise de variância quanto ao efeito da rotação/vazão mássica para os valores totais, resumido na Tabela 3, pôde ser constatado que houve diferença entre o ângulo de saída a 540 rpm e 810 rpm, como mostra a Tabela 6, a 5% de significância.

Tabela 6 - Resultados da análise de variância do ângulo de saída para os tratamentos de rotação e vazão mássica.

Tratamentos	Médias (°)	Resultados	
810/0,152	31,1892	a	
540/0,108	31,5828		b
DMS	0,3808		

Fonte: Autor.

Contrário ao esperado, o ângulo diminuiu com o aumento da velocidade angular. Isto indica que uma investigação mais profunda se faz necessária, inferindo os tratamentos de rotação e vazão mássica para cada palheta. A Tabela 7 exhibe a análise estatística descritiva para as três seções, individualmente.

Tabela 7 - Análise descritiva do ângulo de saída médio em relação as três palhetas ensaiadas.

	Média Aritmética (°)	Desvio padrão	Erro padrão	Intervalo de confiança 95%		Variância
				Limite Mínimo	Limite Máximo	
L	32,9424	4,0181	0,2414	28,9243	36,9605	16,1454
C	33,0446	2,3394	0,1355	30,7052	35,3840	5,4730
V	28,1706	1,7939	0,1061	26,3767	29,9645	3,2181

Fonte: Autor.

Em seguida, foi realizada a análise de variância de cada aleta em relação a rotação e vazão mássica utilizada. O resumo da ANOVA se encontra na Tabela 8.

Tabela 8 - Resumo da aplicação da ANOVA para o ângulo de saída na interação entre os perfis transversais de palheta e a rotação/vazão mássica.

Fatores de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F	F <sub>crítico</sub>	P(F≤Fc)
C x RVM	14,9538	1	14,9538	1,847	3,852	0,1745
L x RVM	22,7739	1	22,7739	2,813	3,852	0,0939
V x RVM	38,2364	1	38,2364	4,722	3,852	0,0300
Resíduo	6922,7864	855	8,0968			
Total	6998,7505	860				

Fonte: Autor.

Ambas as palhetas C e L não apresentaram nenhuma diferença significativa quanto aos ângulos de lançamento, exibindo a mesma tendência. A geometria V seguiu na mesma direção e acabou reduzindo os valores. As três aletas e seus respectivos resultados estão na Tabela 9.

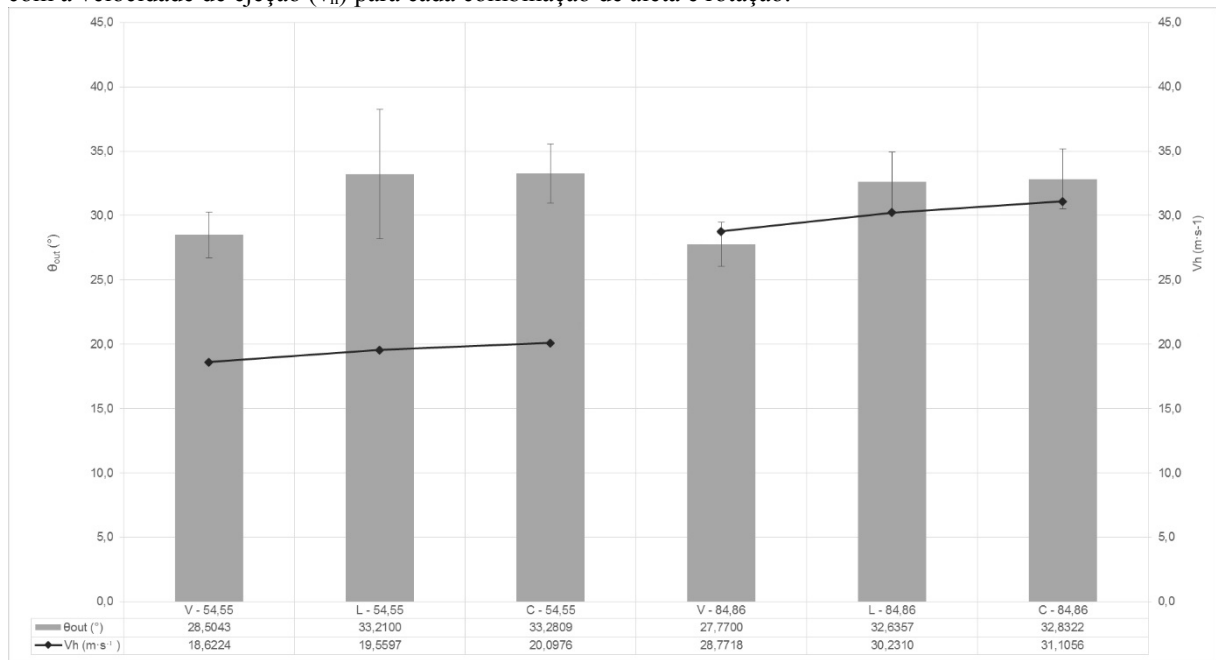
Tabela 9 - Resultados da análise de variância para as interações entre os perfis transversais de palheta e a rotação/vazão mássica em relação ao ângulo de lançamento.

Palheta	Tratamentos	Médias (°)	DMS (°)	Resultados	
L	810/0,152	32,6357	0,9513	A	
	540/0,108	33,2100		A	
C	810/0,152	32,8322	0,5310	A	
	540/0,108	33,2809		A	
V	810/0,152	27,7700	0,4028	A	
	540/0,108	28,5043			b

Fonte: Autor.

A análise dos dados não pode ser realizada baseada apenas no ângulo de ejeção, é necessário observar o efeito da velocidade para cada parâmetro. A Figura 48 apresenta o resultado para todas as palhetas em ambas as rotações.

Figura 48 - Ângulo de saída ( $\theta_{out}$ ) representado pelas barras com barras de erro de 2 desvios padrões relacionados com a velocidade de ejeção ( $v_h$ ) para cada combinação de aleta e rotação.



Fonte: Autor.

Enquanto os dados experimentais mostraram uma atenuação em sua grandeza, a velocidade linear de saída calculada cresceu, isto se deve a relação explícita na equação (9) pois a variável é função proporcional à velocidade angular.

Os valores idênticos apresentados pelas palhetas L e C podem ser justificados pelo aumento da vazão mássica, cerca de 40,7%, quando a rotação foi modificada. Isto intensificou o regime de perdas por interações entre partículas, atuando em conjunto com o aumento da rotação que afeta as forças de resistência pela fricção, aumentando as perdas ao longo do caminho da partícula. Infelizmente uma causa exata não pode ser fornecida apenas com os dados colhidos neste experimento pois houve aumento simultâneo de ambas as variáveis, rotação e vazão mássica, assim nenhuma diferença significativa pôde ser observada. O único fato que pode ser retratado é de que houve a ação de componentes adicionais das forças de resistência.

#### 4.4 Comparativo das propriedades de lançamento

Os dados presentes na literatura não podem ser comparados diretamente com o resultado obtido. Mudanças no diâmetro das partículas, material constituinte, condições superficiais, aparatos experimentais e geometria de montagem afetam diretamente as forças



de fricção. Desta forma, não é prudente analisar ambos os resultados precisamente, pois as circunstâncias e equipamentos afetam as velocidades. Entretanto, comparativos gerais podem e devem ser realizados, pois fornecem indicativos sobre a validade dos dados adquiridos.

Hijazi et al. (2010) afirmam que as velocidades de saída têm valores entre  $25 \text{ ms}^{-1}$  e  $40 \text{ ms}^{-1}$ , confirmando que as grandezas médias do experimento, presentes na Figura 44 de cerca de  $25,0 \text{ ms}^{-1}$  se encontram próximas às previsões. A Tabela 10 resume as condições e valores da velocidade encontrados na literatura especializada em contraste com os dados do estudo. Os campos não preenchidos não foram fornecidos na publicação do estudo em questão.

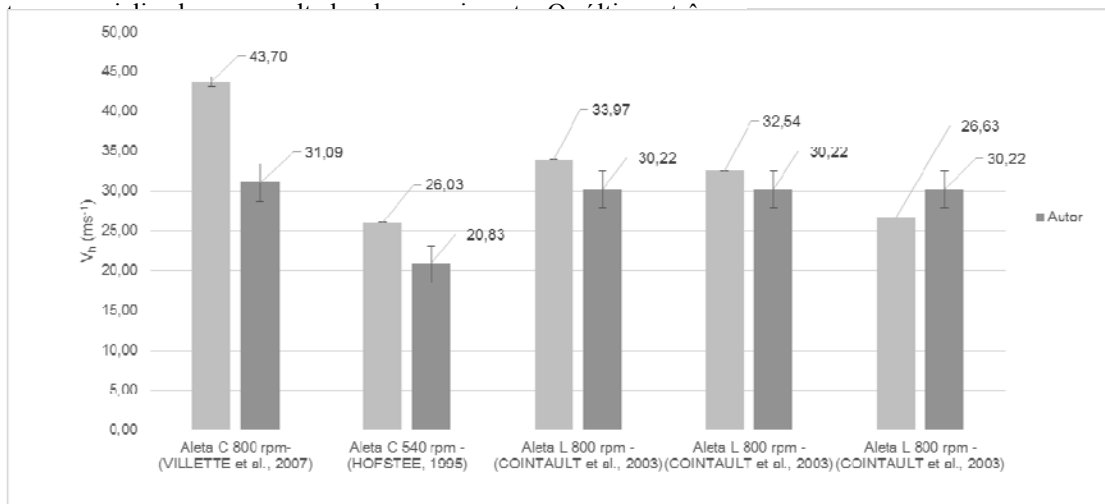
Tabela 10 - Resumo dos dados da literatura especializada em contraste com os resultados do experimento.

Referência	Material	Diâmetro (mm)	Rotação (rpm)	$\alpha$ (°)	$r_{\text{vane}}$ (mm)	Perfil palheta	$\beta$ (°)	$v_h$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$\sigma$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
(VILLETTE et al., 2008)	Esferas calibradas	6	800	0	400	Reta C	3,44	43,70	0,60
(HOFSTEE, 1995)	Teórico	-	540	0	400	Reta C	0	27,63	-
								26,76	
								26,03	
								25,41	
								24,90	
							24,47		
(COINTAULT et al., 2003)	Nitrato de amônio	-	800	0	325	Reta L	0	33,97	-
	NPK 17-17-17	3,67	800		325			32,54	-
	NPK 17-17-17	3,67	800		275			26,63	-
Autor	Carbonato de cálcio granular	1,87	540	0	300	Reta L	0	19,34	5,03
			810					30,22	2,29
			540		308	Reta C		20,83	2,31
			810					31,09	2,33
			540		300	Reta V		18,62	1,78
			810					28,76	1,72

Fonte: Autor.

Relacionando os valores médios das palhetas L e C nas grandezas indicadas com os trabalhos anteriores da Tabela 10 é possível montar a Figura 49.

Figura 49 - Comparativo gráfico da velocidade de saída entre os dados da



Fonte: Autor.

Ao analisar a Figura 49 é reforçado o fato explicitado no parágrafo anterior, os dados colhidos se assemelham com os trabalhos da literatura especializada, mas em geral possuem valores reduzidos. Esta informação combinada com as presentes na Tabela 10 (para palheta L 300 mm) levam a dedução de que para uma mesma rotação e perfil transversal de aleta, mais forte é a divergência quanto maior a diferença do raio de palheta ( $r_{vane}$ ), tanto quando o comprimento é maior (325 mm) (VILLETTE et al., 2008) ou menor (275 mm) (COINTAULT et al., 2003).

## 5 CONCLUSÕES

As análises realizadas apontam distintamente que as mudanças geométricas do perfil transversal, desde que modifique os ângulos de contato, são capazes de alterar as propriedades de saída das partículas do disco. Há contundentes indícios que as forças de fricção sejam função da geometria do perfil transversal, principal responsável pelas alterações. A forte influência do perfil V nas propriedades de saída, se comparado às outras formas ensaiadas, em conjunto com a modelagem analítica do movimento, acabam por reforçar este fato. As medidas de uniformidade apontam para outra faceta destas interações entre partícula e palheta. Enquanto as forças de fricção têm grande impacto nas variáveis de ejeção, sua influência não é tão forte no coeficiente de variação. Desta forma, é possível afirmar que a hipótese de que o perfil transversal da palheta afete significativamente o ângulo de saída é confirmado.

Os dados mostram que uma contenção das partículas, como a aba superior do perfil C, é mais significativa para aumentar a uniformidade de distribuição sem interferir na largura de deposição máxima. Os efeitos da alteração na vazão mássica e rotação trouxeram informações inesperadas em relação ao ângulo de saída das partículas. Elas indicam que há uma intensificação ou adição de componentes de resistência durante o aumento da vazão mássica, principalmente em perfis que impõem maiores perdas durante o caminho. Não foi possível precisar a causa deste comportamento. Finalmente, os dados foram aferidos em relação aos apresentados pela literatura especializada, certificando que as informações colhidas durante o experimento estão de acordo com os valores médios publicados.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Trabalhos futuros podem expandir estas conclusões, fornecendo mais ferramentas para analisar os efeitos dos perfis nas forças de resistência. A elaboração e validação de modelos computacionais para o ensaio de vários perfis de palheta, buscando grandes larguras de cobertura e uniformidade de aplicação simultaneamente. Busca de um algoritmo de processamento de imagens capaz de extrair as informações das imagens adquiridas com baixo contraste. Ao que tange a agricultura de precisão, é imperativo investigar o efeito do perfil transversal com diferentes vazões verificando se o comportamento das palhetas é compatível com uma distribuição de taxa variável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHALE, A.; BOLANDER, N.; PARK, J.; SHAW, L.; SVEC, J.; WASSGREN, C. Granular Fertiliser Particle Dynamics on and off a Spinner Spreader. **Biosystems Engineering**, v. 85, n. 3, p. 319-329, 2003.

CASE IH AGRICULTURE. **Semeadoras para grãos miúdos**. Sorocaba, SP, 2012. 8 p.

COETZEE, C. J.; LOMBARD, S. G. Discrete element method modelling of a centrifugal fertiliser spreader. **Biosystems Engineering**, v. 109, n. 4, p. 308-325, 2011.

COINTAULT, F.; SARRAZIN, P.; PAINDAVOINE, M. Measurement of the Motion of the Fertilizer Particles Leaving a Centrifugal Spreader Using a Fast Imaging System. **Precision Agriculture**, v. 4, n. 3, p. 279-295, 2003.

COOL, S.; PIETERS, J.; MERTENS, K. C.; HIJAZI, B.; VANGEYTE, J. A simulation of the influence of spinning on the ballistic flight of spherical fertiliser grains. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 105, n. 1, p. 121-131, 2014.

DINTWA, E.; VAN LIEDEKERKE, P.; OLIESLAGERS, R.; TIJSKENS, E.; RAMON, H. Model for Simulation of Particle Flow on a Centrifugal Fertiliser Spreader. **Biosystems Engineering**, v. 87, n. 4, p. 407-415, 2004.

GRIFT, T. E.; HOFSTEE, J. W. Measurement of Velocity and Diameter of Individual Fertilizer Particles by an Optical Method. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 66, n. 3, p. 235-238, 1997.

GRIFT, T. E.; KWEON, G.; HOFSTEE, J. W.; PIRON, E.; VILLETTE, S. Dynamic Friction Coefficient Measurement of Granular Fertiliser Particles. **Biosystem Engineering**, v. 95, n. 4, p. 507-515, 2006.

HIJAZI, B.; COINTAULT, F.; DUBOIS, J.; COUDERT, S.; VANGEYTE, J.; PIETERS, J.; PAINDAVOINE, M. Multi-phase cross-correlation method for motion estimation of fertiliser granules during centrifugal spreading. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 6, p. 684-702, 2010.

HOFSTEE, J. W. Handling and Spreading of Fertilizers Part 2: Physical Properties of Fertilizer, Measuring Methods and Data. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 53, n. 1, p. 141-162, 1992.

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**, v. 58, n. 1, p. 1-16, 1994.

HOFSTEE, J. W. Handling and Spreading of Fertilizers Part 5: The Spinning Disc Type Fertilizer Spreader. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 62, n. 1, p. 143-162, 1995.

HOFSTEE, J. W.; HUISMAN, W. Handling and Spreading of Fertilizers Part 1: Physical Properties of Fertilizer in Relation to Particle Motion. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 47, n. 1, p. 213-234, 1990.

JING, L.; STEPHANSSON, O. **Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering**: Theory and Applications. 1 ed. Amsterdam, Países Baixos: Elsevier Science, 2007.

KUHN. **Fertilizer spreaders**. Saverne, França, 2013. 24 p.

KWEON, G.; GRIFT, T. E.; MICLET, D. A spinning-tube device for dynamic friction coefficient measurement of granular fertiliser particles. **Biosystems Engineering**, v. 97, n. 2, p. 145-152, 2007.

LAND PRIDE: PFS Series Spreaders. **pfs4000.jpg**. Disponível em: <<http://www.landpride.com/products/113/pfs-series-spreaders>>. Acesso em: 02 out. 2014.

MEPEL: banco de dados. **DC\_1500 (44).jpg**. Estação, 2014a.

MEPEL: banco de dados. **DC\_1500 (6).jpg**. Estação, 2014b.

MOLIN, J. P.; MENEGATTI, L. A. A. Desempenho de distribuidora a lança com doses variáveis de uréia. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v. 23, n. 2, p. 290-299, 2003.

OLIESLAGERS, R.; RAMON, H.; BAERDEMAEKER, J. D. Calculation of Fertilizer Distribution Patterns from a Spinning Disc Spreader by means of a Simulation Model. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 63, n. 2, p. 137-152, 1996.

ORTIZ-CAÑAVATE, J. **Las máquinas agrícolas y su aplicación**. 6 ed. Madrid, Espanha: Ediciones Mundo-Prensa, 2003.

PARISH, R. L.; Granular Spreaders: Selection, calibration, testing and use. Bulletin/Louisiana Agricultural Experiment Station, Unknown Binding, 1999, 68 p.

PETTERSEN, J. M.; SVENDSEN, J. A.; OVLAND, S. A Method of Studying the Influence of Fertilizer Particle Size on the Distribution from a Twin-disc Spreader. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 50, n. 1, p. 291-303, 1991.

RAUCH: RAUCH wir nehmen's genau. **AGT\_0913.jpg**. Disponível em: <<http://rauch.de/deutsch/downloads/pressebilder-agt.html>>. Acesso em: 02 out. 2014.

REUMERS, J.; TIJSKENS, E.; RAMON, H. Experimental Characterisation of the Tangential and Cylindrical Fertiliser Distribution Pattern from a Spinning Disc: A Parameter Study. **Biosystems Engineering**, v. 86, n. 3, p. 327-337, 2003a.

REUMERS, J.; TIJSKENS, E.; RAMON, H. Experimental Characterisation of the Tangential and Cylindrical Fertiliser Distribution Pattern of Centrifugal Fertiliser Spreaders: towards an Alternative for Spreading Hall Measurements. **Biosystems Engineering**, v. 86, n. 4, p. 431-439, 2003b.

SILVEIRA, G. M. **Máquinas para plantio e condução das culturas**. 1 ed. Viçosa, MG: Editora Aprenda Fácil, 2001.

SRIVASTAVA, A. K.; GOERING, C. E.; ROHRBACH, R. P.; BUCKMASTER, D. R. **Engineering Principles of Agricultural Machines**. 2 ed. St. Joseph, EUA: ASABE, 2006.

STARA. **Manual de instruções e catálogo de peças Hércules 10000 inox**. Revisão 06. Não-Me-Toque, RS, 2010. 45 p.

STARA. **VICTÓRIA TOP DPS e VICTÓRIA SEMENTES DPS**: Plantadoras para sementes graúdas com alto poder de precisão. Não-Me-Toque, RS, 2014, 7 p.

VALTRA: Distribuidor de fertilizantes. **8357706163\_7bf606f080\_o.jpg**. Disponível em: <<http://www.valtra.com.br/imprensa/banco-de-imagens/72157632301172227>>. Acesso em: 02 out. 2014.

VAN LIEDEKERKE, P.; TIJSKENS, E.; DINTWA, E.; ANTHONIS, J.; RAMON, H. A discrete element model for simulation of a spinning disc fertilizer spreader I. Single particle simulations. **Powder Technology**, v. 170, n. 2, p. 71-85, 2006.

VAN LIEDEKERKE, P.; TIJSKENS, E.; DINTWA, E.; RIOUAL, F.; VANGEYTE, J.; RAMON, H. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader. **Powder Technology**, v. 102, n. 4, p. 392-405, 2009.

VILLETTE, S.; PIRON, E.; COINTAULT, F.; CHOPINET, B. Centrifugal spreading of fertiliser: Deducing three-dimensional velocities from horizontal outlet angles using computer vision. **Biosystems Engineering**, v. 99, n. 4, p. 496-507, 2008.

VILLETTE, S.; PIRON, E.; MARTIN, R.; MICLET, D.; BOILLETOT, M.; GÉE, C. Measurement of an equivalent friction coefficient to characterise the behaviour of fertilisers in the context of centrifugal spreading. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 6, p. 664-683, 2010.

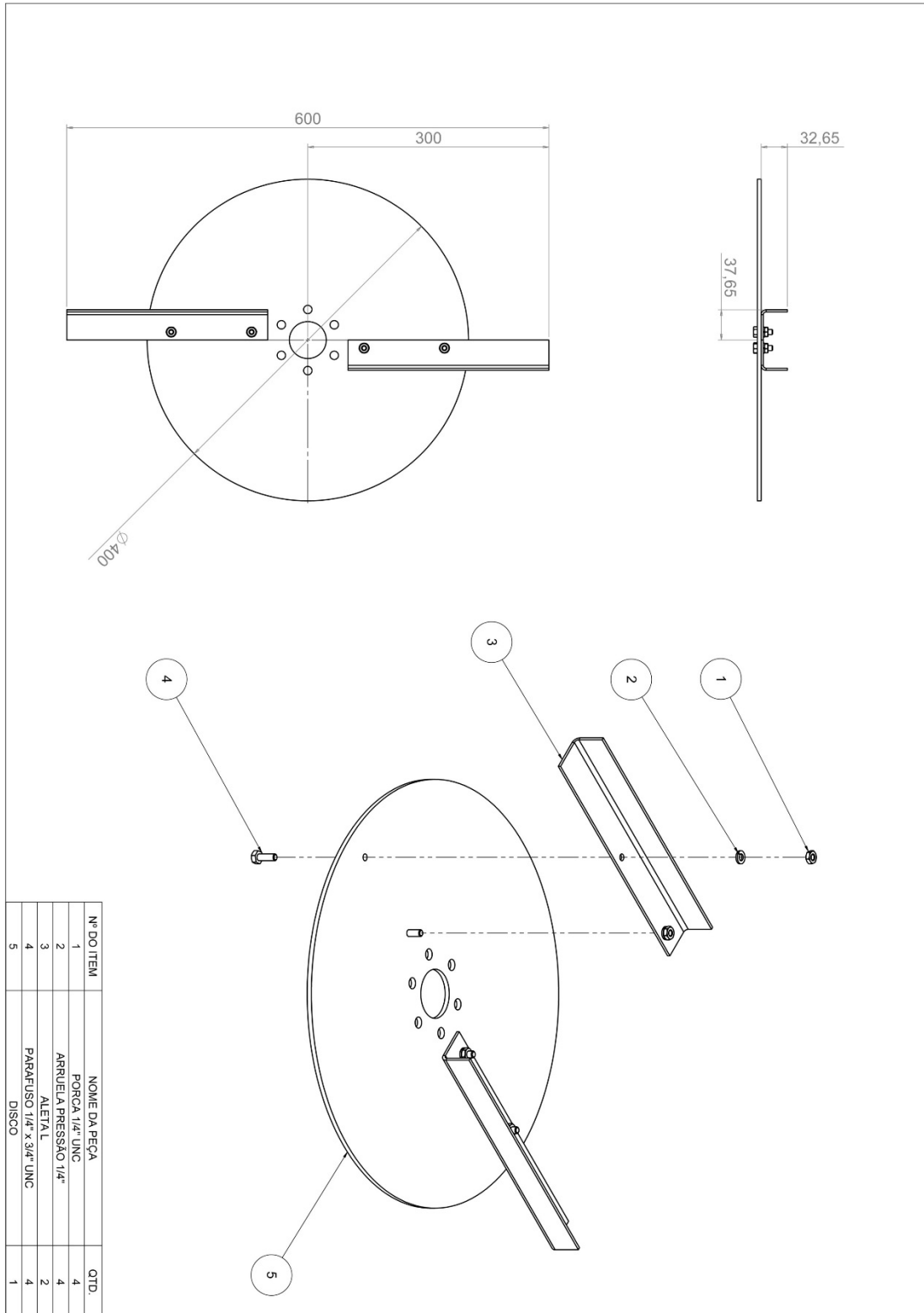
VILLETTE, S.; PIRON, E.; MARTIN, R.; MICLET, D.; JONES, G.; PAOLI, J-N.; GÉE, C. Estimation of two-dimensional fertiliser mass flow distributions by recording granule impacts. **Biosystems Engineering**, v. 115, n. 4, p. 463-473, 2013.

WALKER, J. **Fundamentals of Physics**. 8 ed. New York, EUA: John Wiley & Sons, 2007.

YILDIRIM, Y.; KARA, M. Effect of Different Vane Combinations on Fertilizer Distribution Uniformity with Various Flow Rates in Spinning Disc Broadcasters. **Journal of Agricultural Sciences**, v. 18, n. 1, p. 54-62, 2012.

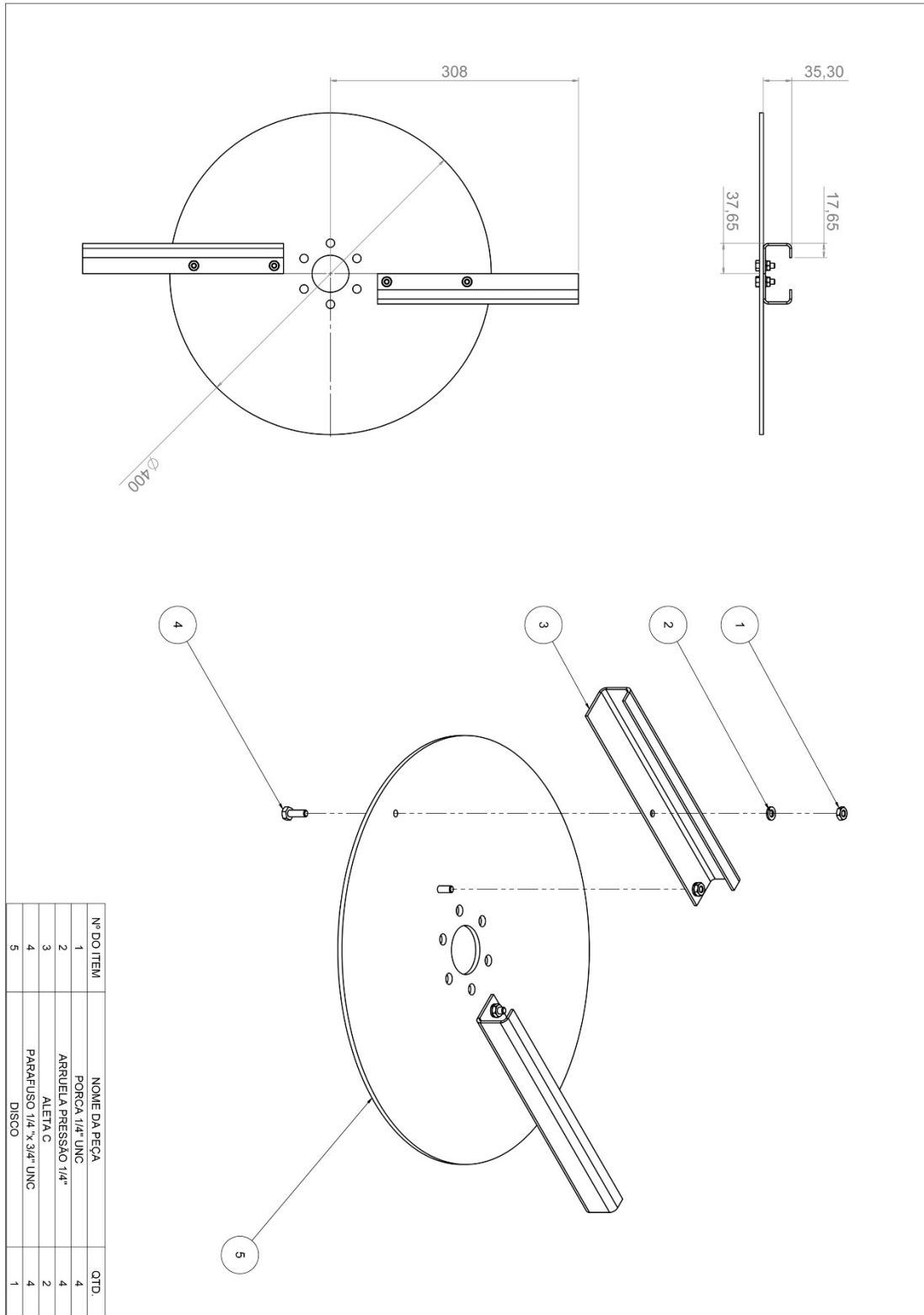
# APÊNDICE A

## A.1 Conjunto de disco com palheta L





## A.2 Conjunto de disco com palheta C



**A.3 Conjunto de disco com palheta V**

