

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Bruno Garlet Alberti

**ESTUDO DAS FUNCIONALIDADES DE CONDUÇÃO E DEPOSIÇÃO
DE SEMENTES DE SOJA EM SEMEADORAS DE PRECISÃO**

Santa Maria, RS
2024

Bruno Garlet Alberti

**ESTUDO DAS FUNCIONALIDADES DE CONDUÇÃO E DEPOSIÇÃO DE
SEMENTES DE SOJA EM SEMEADORAS DE PRECISÃO**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Orientador: Prof. Vinicius Kaster Marini, Ph.D.

Santa Maria, RS
2024

Bruno Garlet Alberti

**ESTUDO DAS FUNCIONALIDADES DE CONDUÇÃO E DEPOSIÇÃO DE
SEMENTES DE SOJA EM SEMEADORAS DE PRECISÃO**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Aprovado em 29 de fevereiro de 2024:

Prof. Vinicius Kaster Marini, Ph.D.
(Presidente/orientador)

Prof. Leonardo Nabaes Romano, Dr. Eng

Prof. Ruy Casão Junior, Dr. Eng

Santa Maria, RS
2024

AGRADECIMENTOS

Concedo meus sinceros agradecimentos para todos aqueles que se fizeram, de alguma forma, presente ao meu lado durante minha jornada acadêmica:

Agradeço primeiramente a Deus por sempre guiar meu caminho e permitir realizar mais esta grande etapa de minha vida;

Agradeço aos meus pais, Carlos e Carmem, os quais são minha base e principais responsáveis pelas minhas conquistas, sempre acreditando na minha capacidade e me dando forças para atingir meus objetivos;

Agradeço ao meu irmão Thiago, por toda a parceria e companheirismo;

Agradeço a minha parceira, Katlen que sempre esteve ao meu lado compartilhando todos os bons e maus momentos, sendo compreensiva e paciente durante os momentos exigentes da graduação;

Agradeço ao meu orientador, prof. Vinicius, que desde o início da graduação trabalhamos juntos no Laboratório de Projetos de Sistemas Técnicos (LPST) e me transmitiu grande parte do conhecimento adquirido durante minha pesquisa, sendo sempre paciente e confiando na minha capacidade;

Agradeço a Universidade Federal de Santa Maria, corpo de docente e discente, por dele ter feito parte e pelo ensino de qualidade e gratuito;

Enfim, agradeço a todos que participaram de alguma maneira da minha vida e me ajudaram a chegar onde estou hoje.

RESUMO

ESTUDO DAS FUNCIONALIDADES DE CONDUÇÃO E DEPOSIÇÃO DE SEMENTES DE SOJA EM SEMEADORAS DE PRECISÃO

AUTOR: Bruno Garlet Alberti,
ORIENTADOR: Vinicius Kaster Marini

A produção de grãos desempenha um papel fundamental na economia brasileira, sendo responsável por fornecer alimentos, gerar empregos, impulsionar a inovação tecnológica e contribuir para a balança comercial do país. Diante deste cenário, encontram-se as tecnologias presentes nas máquinas e implementos de trabalho com a terra. No âmbito de semeadoras precisas, o desenvolvimento de inovações está em alta, pois a precisão do plantio é derivada da eficiência do uso da terra, uma vez que todo o processo produtivo é dependente dos resultados obtidos na semeadura. Nesse contexto, o objetivo geral deste trabalho é estudar funcionalidades de semeadura que entregam atributos relacionados à dosagem/singulação e entrega de semente de soja sobre o sulco de semeadura de maneira uniforme. Para o alcance deste objetivo, este estudo envolve: (1) a execução de pesquisas bibliográfica e documental para estabelecer o estado da arte em semeadoras de precisão; (2) o estudo qualitativo e quantitativo das funcionalidades de condução e entrega de sementes em semeadoras de precisão; (3) a implementação de modelo analítico para prever o comportamento em queda da semente de soja individualizada em uma semeadora de precisão. Como resultados, foi implementada a modelagem das funcionalidades de condução e de entrega da semente, em duas modalidades: (1) modalidade qualitativa, em que é proposto um modelo em diagrama de blocos para a análise funcional da entrega de sementes em semeadoras de precisão; (2) modalidade quantitativa, em que é proposto um modelo analítico capaz de prever o comportamento da semente singulada de soja em queda até sua deposição ao sulco. Em conclusão, foi possível determinar a estrutura funcional das seguintes funções principais: “F2 dosar sementes” e “F4 entregar sementes”. Em seguida, foi demonstrado o comportamento da trajetória da semente de soja perante dois graus de liberdade, considerando a soja como uma partícula em queda livre que sofre colisões e mudança de coordenadas a cada contato com o equipamento. Além disso, foi determinada a variação do comportamento da semente para distintas velocidades de deslocamento da semeadora e pôs fim à variação de energia total da semente em movimento, ademais, a velocidade com que a semente é entregue no solo. Por fim, identificou-se oportunidades de pesquisa futuras, sejam elas através de simulações computacionais e testes práticos em campo de semeadura.

Palavras-chaves: Semeadura precisa. Dosadores e condutores. Trajetória da semente. Pesquisa de anterioridade.

ABSTRACT

STUDY OF THE FUNCTIONALITIES OF CONDUCTION AND DEPOSITION OF SOYBEAN SEEDS IN PRECISION SEEDERS

AUTHOR: Bruno Garlet Alberti
SUPERVISOR: Vinicius Kaster Marini

Grain production plays a fundamental role in the Brazilian economy, being responsible for providing food, generating jobs, boosting technological innovation and contributing to the country's trade balance. Given this scenario, we find the technologies present in machines and implements for working with the land. In the context of precise seeders, the development of innovations is on the rise, as planting precision is derived from the efficiency of land use, since the entire production process is dependent on the results obtained during sowing. In this context, the general objective of this work is to study sowing functionalities that deliver attributes related to the dosage/singulation and delivery of soybean seed over the sowing furrow in a uniform manner. To achieve this objective, this study involves: (1) carrying out bibliographic and documentary research to establish the state of the art in precision seeders; (2) the qualitative and quantitative study of seed conduction and delivery functionalities in precision seeders; (3) the implementation of an analytical model to predict the falling behavior of individual soybean seeds in a precision seeder. As results, the modeling of seed conduction and delivery functionalities was implemented, in two modalities: (1) qualitative modality, in which a block diagram model is proposed for the functional analysis of seed delivery in precision seeders; (2) quantitative modality, in which an analytical model capable of predicting the behavior of the singulated soybean seed in fall until its deposition in the furrow is proposed. In conclusion, it was possible to determine the functional structure of the following main functions: “F2 dose seeds” and “F4 deliver seeds”. Next, the behavior of the soybean seed trajectory was demonstrated with two degrees of freedom, considering the soybean as a particle in free fall that undergoes collisions and changes in coordinates with each contact with the equipment. Furthermore, the variation in the behavior of the seed was determined for different speeds of movement of the seeder and put an end to the variation in the total energy of the seed in movement, in addition, the speed at which the seed is delivered to the soil. Finally, future research opportunities were identified, whether through computer simulations or practical tests in the sowing field.

Keywords: Precise sowing. Seed meter and Seed tube. Seed trajectory. Patent research.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Representação da influência da compactação nas funções desempenhadas pelo solo.....	24
FIGURA 2 - Produtividade da cultura da soja em função da resistência da penetração.....	26
FIGURA 3 - Funções parciais de uma semeadora de precisão	32
FIGURA 4 – Modelo exemplificado da funcionalidade do downforce	33
FIGURA 5 – Variações na distribuição das sementes.....	35
FIGURA 6 - Semeadora Allis Chalmers importada dos EUA para iniciar o Plantio Direto no <i>Brasil</i>	37
FIGURA 7 - Evolução da área sob plantio direto no Brasil.....	38
FIGURA 8 - Semeadora de precisão	41
FIGURA 9 - Semeadora precisa.....	42
FIGURA 10 - Dosador de semente de disco horizontal	43
FIGURA 11 - Dosador pneumático de semente com pressão negativa	45
FIGURA 12 – Mecanismos de acionamento do sistema de dosagem: (a) acionamento roda terra e (b) acionamento elétrico.....	46
FIGURA 13 – Exemplo de tubo condutor (a) por queda livre e tubo condutor (b) ativo de semente	47
FIGURA 14 – Sementes em condições regular e sementes com colisões seguidas no tubo condutor	50
FIGURA 15 - Sistema <i>ExactEmerge</i> , John Deere.....	52
FIGURA 16 - Sistema <i>vSet</i> e <i>Speed Tube (Precision Planting)</i>	52
FIGURA 17 - Sistema <i>True Speed (Kinze Manufacturing)</i>	53
FIGURA 18 - Sistema <i>VControl (TOPlanting)</i>	54
FIGURA 19 - Sistema <i>AirVac</i> e <i>AirSpeed</i> (Horsch)	55
FIGURA 20 - Diferença entre tubo condutor reto e curvado	56
FIGURA 21 - Tubo condutor de semente <i>Case Corporation</i>	56
FIGURA 22 - Tubo condutor de semente (John Deere).....	57
FIGURA 23 - Tubo condutor de semente (<i>Precision Planting</i>).....	58
FIGURA 24 - Modelo Geral de Processos Técnicos.....	63
FIGURA 25 - Fluxo principal de funções do dosador e tubo condutor de semente.....	66
FIGURA 26 - Estrutura funcional das subseções de dosagem e condução de sementes	68
FIGURA 27 - Semeadora Kuhn Extra.....	69

FIGURA 28 - Sistema de dosagem vSet Precision Planting	70
FIGURA 29 - Regiões de vácuo no dosador	71
FIGURA 30 - Dimensões do disco do dosador	72
FIGURA 31 - Componentes da velocidade	74
FIGURA 32 - Componentes de módulo e direção da semente	75
FIGURA 33 - Dimensões do tubo condutor de sementes	78
FIGURA 34 – Dimensões do tubo condutor utilizado para os cálculos da análise dinâmica ..	79
FIGURA 35 - Exemplificação da altura de queda de semente.....	80
FIGURA 36 - Modelo esquemático do rolamento de uma esfera em um plano inclinado	82
FIGURA 37 – Variação das velocidades resultantes da semente antes da primeira colisão com o interior do tubo condutor, em função da velocidade de semeadura.....	85
FIGURA 38 - Variação da trajetória da semente em função das colisões	87
FIGURA 39 - Variação da trajetória da semente em função do número de colisões no interior do tubo condutor	88
FIGURA 40 - Variação da velocidade da semente em função do número de colisões.....	90
FIGURA 41 - Variação da energia total da semente sobre o número de colisões	91

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Decomposição da variação da velocidade de liberação da semente pelo disco dosador.....	84
TABELA 2 - Número de colisões para distintas velocidades de semeadura	86
TABELA 3 – Predição da velocidade de queda da semente em função da posição para distintas velocidades de semeadura, segundo modelo determinístico deste trabalho	89

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 Classes de solos encontradas no Brasil de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.....	22
QUADRO 2 - População de plantas de acordo com espaçamento entre as fileiras e o número de plantas por metro linear.	28
QUADRO 3: Equações do MRU e MRUV utilizadas para modelagem analítica da semente em queda.....	60

LISTA DE VARIÁVEIS

PP	População de plantas por hectare.....	[1]
ES	Espaçamento entre as sementes	[m]
e	Coefficiente de restituição	[1]
V_{af}	Velocidade de afastamento	$[m \cdot s^{-1}]$
V_{ap}	Velocidade de aproximação.....	$[m \cdot s^{-1}]$
V_m	Velocidade média instantânea	$[m \cdot s^{-1}]$
dx/dt	Derivada da posição em função do tempo percorrido	$[m \cdot s^{-1}]$
dv/dt	Derivada da velocidade em função do tempo percorrido	$[m \cdot s^{-2}]$
x	Posição instantânea.....	[m]
x_o	Posição inicial.....	[m]
\dot{x}_o	Velocidade inicial (derivada da posição inicial).....	$[m \cdot s^{-1}]$
\dot{x}	Velocidade (derivada da posição).....	$[m \cdot s^{-1}]$
\ddot{x}	Aceleração (derivada segunda da posição).....	$[m \cdot s^{-2}]$
t	Tempo	[s]
Δx	Variação da posição	[m]
V_d	Velocidade linear do disco do dosador	$[m \cdot s^{-1}]$
r	Raio do disco do dosador.....	[m]
f	Frequência.....	[rpm]
NS	Número de sementes por metro	[m]
NA	Número de alvéolos no disco dosador	[1]
V_{dx}	Componente “x” da velocidade linear do disco dosador	$[m \cdot s^{-1}]$
V_{dy}	Componente “y” da velocidade linear do disco dosador	$[m \cdot s^{-1}]$
V_{px}	Componente “x” da velocidade de semeadura	$[Km \cdot h^{-1}]$
V_{py}	Componente “y” da velocidade de semeadura	$[Km \cdot h^{-1}]$
V_{sx}	Componente “x” da velocidade da semente	$[m \cdot s^{-1}]$
V_{sy}	Componente “y” da velocidade da semente	$[m \cdot s^{-1}]$
V_s	Velocidade resultante da semente.....	$[m \cdot s^{-1}]$
β	Ângulo de liberação da semente	[graus]
X	Deslocamento da semeadora.....	[m]
\vec{Q}	Quantidade de movimento	$[Kg \cdot m \cdot s^{-1}]$
m	Massa da semente	[Kg]

r_s	Raio da semente.....	[m]
N	Normal da decomposição de forças.....	[N]
g	Aceleração da gravidade.....	[m · s ⁻²]
θ	Ângulo do tubo condutor.....	[graus]
V_o	Velocidade inicial após a última colisão.....	[m · s ⁻¹]
h	Altura.....	[m]
a_{cm}	Aceleração do centro de massa da semente.....	[m · s ⁻²]
F_{at}	Força de atrito da semente.....	[N]
I_{cm}	Momento inércia da semente.....	[Kg · m ²]
τ_{res}	Torque resultante da semente.....	[N · m]
E_c	Energia Cinética.....	[J]
E_p	Energia Potencial.....	[J]
ω_o	Velocidade rotacional.....	[rad · s ⁻¹]
α	Aceleração angular.....	[rad · s ⁻²]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	17
1.2	OBJETIVOS.....	18
1.2.1	Objetivo geral	18
1.2.2	Objetivos Específicos.....	18
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	FATORES DE INFLUÊNCIA SOBRE A ENTREGA DE SEMENTES	20
2.1.1	Entrega da semente	20
2.1.1.1	Composição do solo	21
2.1.1.2	Resistência do solo	25
2.1.1.3	Disponibilidade de nutrientes	26
2.1.1.4	Definição de população de plantas por área e suas características físicas	27
2.1.1.5	Colisões e o coeficiente de restituição da semente de soja	29
2.1.1.6	Variações de velocidades de semeadura	30
2.2	REQUISITOS DE PROJETO DAS SEMEADORAS	30
2.2.1	Parâmetros mecânicos de plantabilidade.....	30
2.2.1.1	Estabilidade do carro de linha da semeadora	32
2.2.1.2	Equidistância	34
2.2.1.3	Execução do sulco	36
2.3	EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS SEMEADORAS.....	36
2.3.1	Surgimento do plantio direto.....	37
2.3.2	Semeadura de precisão	39
2.3.3	Semeadoras de precisão e semeadoras precisas.....	41
2.4	MECANISMOS DE SINGULAÇÃO DE SEMENTES	43
2.4.1	Dosador de semente de disco horizontal.....	43
2.4.2	Dosador pneumático.....	44
2.4.3	Acionamento dos elementos dosadores.....	45
2.5	MECANISMOS DE ENTREGA DE SEMENTE.....	46
2.5.1	Condução de sementes ao sulco.....	47
2.5.2	Parâmetros pertinentes à singulação das sementes.....	48
2.5.3	Parâmetros pertinentes à condução das sementes.....	49

2.6	PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO EVOLUÍDOS PARA CONDUZIR SEMENTES	51
2.6.1	Condução por elementos mecânicos	51
2.6.2	Condução ativa pneumática	54
2.6.3	Análise de tecnologias de condução de sementes por gravidade.....	55
2.6.4	Análise crítica pertinente aos princípios de soluções	58
2.7	TEORIA DA DINÂMICA DE PARTÍCULAS	59
2.7.1	Movimento retilíneo uniformemente variado	59
3	METODOLOGIA	61
3.1	DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	61
3.1.1	Pesquisa Exploratória	62
3.1.2	Pesquisa Descritiva.....	62
3.1.3	Pesquisa Experimental.....	64
3.1.4	Considerações necessárias para elaboração do equacionamento dinâmico.....	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.1	ESTRUTURA DE FUNCIONAL DAS SUBFUNÇÕES DE DOSAGEM E CONDUÇÃO DE SEMENTES	66
4.2	MODELAGEM DETERMINÍSTICA DA DINÂMICA DA SEMENTE	69
4.2.1	Caracterização analítica do dosador de sementes	69
4.2.2	Particularidade da área com presença de vácuo	70
4.2.3	Características dimensionais de discos dosadores de sementes	71
4.2.4	Método de definição da velocidade linear resultante do disco dosador	72
4.2.5	Análise das componentes da velocidade	73
4.2.6	Determinação do ângulo de liberação da semente	75
4.2.7	Determinação da trajetória da semente	76
4.2.8	Determinação da quantidade de movimento da semente ao ser liberada	77
4.2.9	Determinação da velocidade da semente ao impactar o solo livremente	77
4.2.10	Caracterização analítica do tubo condutor.....	78
4.2.11	Colisão da semente na parede do tubo condutor.....	80
4.2.12	Rolamento completo da semente no interior do tubo condutor.....	81
4.3	RESULTADOS OBTIDOS DO MODELO DETERMINÍSTICO	84
4.3.1	Velocidade anterior da semente antes da 1º colisão com o interior do tubo condutor	84
4.3.2	Variações na trajetória da semente em função das colisões no interior do tubo condutor	86

4.3.3	Velocidade da semente durante a trajetória até o sulco de semeadura.....	89
4.3.4	Energia total da semente variando em função do número de colisões	90
4.4	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS E FONTES DA LITERATURA.....	91
5	CONCLUSÃO	93

1 INTRODUÇÃO

A soja é considerada uma das culturas mais importantes no Brasil em razão do seu alto potencial produtivo, havendo aplicações desde a alimentação humana, nutrição animal e expressivo efeito socioeconômico. De acordo com Frente Parlamentar da Agropecuária (2021), a cadeia produtiva da soja movimenta US\$ 100 bilhões/ano no Brasil.

A crescente demanda da soja, estimulada pela versatilidade do grão, tem intensificado a produção no país, exigindo aumento da produção para suprir as necessidades globais. Para 2029, a projeção é de aumento de 32% da produção, 22% do consumo e 41% das exportações segundo Aprosoja Brasil (2020), sendo que a semeadura precisa é uma das principais alternativas para o aumento produtivo.

Segundo Bellé *et al.* (2018), o estabelecimento das culturas, e as tecnologias de semeadura são aspectos influenciadores no rendimento e na produtividade. A precisão do plantio é um fator importante na eficiência do uso da terra, uma vez que todo o processo produtivo é dependente dos resultados obtidos na semeadura.

De acordo com Portella (1999), com as perspectivas de maiores produções, cresce o interesse dos usuários e os questionamentos, bem como a necessidade de produtos de qualidade, confiabilidade e eficiência agrônômica. No mercado de agronegócio brasileiro existe uma variada oferta de modelos de semeadoras para plantio direto, o que torna complexa a tomada de decisão por parte do agricultor. Dessa forma, se concentram os esforços de pesquisa e desenvolvimento nas áreas de projeto e implementação de melhorias no âmbito de deposição e entrega de sementes no sulco de semeadura em semeadoras precisas.

Contudo, a pesquisa em mecanismos que possibilitam uma melhor plantabilidade tem sido objeto de grande interesse nas últimas décadas, visto que a tendência da produção brasileira está em constante crescimento ano após ano, com projeções futuras. Neste cenário, o desenvolvimento de semeadoras de alto nível tecnológico encontra-se aquecido, a fim de aperfeiçoar inteligências de plantio que possam ser implementados no carro de linha da semeadora que possibilitam depositar a semente no sulco de plantio regular, posicionado cada semente na melhor condição de crescimento possível.

Este trabalho consiste em identificar as semeadoras de plantio direto existentes no mercado, considerando uma análise quanto ao carro de linha, dosador e condutor de semente, em respeito ao percurso dinâmico da semente de soja.

O estudo é executado com objetivo de identificar os fatores de influência do percurso da semente em função da sua equidistância, e melhoramento na produtividade a partir do processo da semeadura precisa. A determinação da estrutura funcional das funções principais “F2 dosar sementes” e “F4 entregar sementes” são os processos chaves para o início do desenvolvimento do trabalho, pois após determinadas, originam as hipótese e considerações necessárias para a definição analítica da dinâmica da semente no âmbito da dosagem e condução por meio da força da gravidade.

1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

O contexto apresentado possibilita concluir que o mercado do setor produtivo de máquinas agrícolas mesmo aquecido como demonstra os dados obtidos de 2020, onde houve um aumento na produção de máquinas agrícolas em 17%. No entanto, em 2021 a surpresa foi ainda maior, com o atingimento de 42%, e mesmo dentro desse cenário, a própria indústria agrícola sozinha foi responsável por 6,4% do Produto Interno Bruto nacional, com mais R\$ 540 bilhões (AGROBID, 2023).

Investigado o setor de desenvolvimento de máquinas agrícolas levando em consideração o aumento da complexidade dos produtos, tem-se a necessidade da transversalização do conhecimento envolvido no projeto e no desenvolvimento de novas máquinas, envolvendo a utilização de modelos de caráter sistemático. Entra em foco a modelagem de verificação de atributos identificados como fatores de influência no projeto de máquinas agrícolas no meio da agricultura de precisão (MARINI, 2007). Inteirando-se com as características e as necessidades operacionais de forma organizada, é possível aos times de engenharia na indústria construir projetos diferenciados para melhor atender as exigências de operação e gerar melhor desempenho de produtividade.

Segundo Horbe; Grave (2021), quantificaram em suas análises a penalização no potencial produtivo relacionados com os problemas de plantabilidade, ou seja, a variabilidade produtiva entre as plantas é ocasionada por problemas na distribuição na linha de plantio, fato demonstrado graficamente em resultados de máximo potencial produtivo para cada centímetro de distância adequado em um estudo com duas variedades de semente de soja. Resultados tais como mostrados por esse trabalho motiva a realização de esforços a fim de oportunizar uma contribuição teórica e implementação prática, além de possibilitar à indústria melhor capacidade para observar as exigências do setor de máquinas agrícolas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é estudar as funcionalidades de condução e deposição de sementes em semeadoras de precisão para sementes de soja.

1.2.2 Objetivos Específicos

Devem ser considerados como objetivos específicos, as funções parciais que contribuem para o alcance da meta declarada como objetivo geral:

- Estudar o estado da arte em respeito da entrega de sementes de soja sobre o sulco de semeadura.
- Realizar um modelo funcional da entrega da semente de soja em semeadoras precisas de disco vertical pneumático.
- Realizar a modelagem analítica da semente de soja em queda desde a saída do dosador, passagem pelo condutor e chegada até o sulco de semeadura.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Os princípios iniciais estabelecem o contexto no qual este estudo é executado, em função do conhecimento tecnológico em soluções de deposição e condução de sementes em semeadoras de precisão para sementes de soja, a fim de contribuir no desenvolvimento de semeadoras mais precisas, de forma ágil em relação a semeadoras existentes no mercado atual.

A segunda seção apresenta o estudo da arte, em respeito aos recursos embarcados em semeadoras precisas, que habilitam o manejo localizado e o plantio preciso na operação de semeadura quanto ao mecanismo do carro de linha, dosador e condutor de sementes,

A terceira seção expressa o conhecimento sobre o caminho dinâmico da semente e os fatores que influenciam a operação nos princípios técnicos de trabalho que habilitam ao manejo localizado e ao plantio preciso na operação de semeadura. A técnica utilizada em semeaduras precisas é caracterizada através de patentes implementadas em soluções comercializadas no Brasil ou em outros mercados desenvolvidos pela mesma fabricante de semeadoras precisas.

A quarta seção desenvolve uma análise física e dinâmica da queda livre da semente desde a saída do dosador, passagem pelo condutor e chegada até o sulco de semeadura. Com auxílio da implementação e modelagem computacional.

Por fim, a quinta e última parte atribui as conclusões obtidas do trabalho e as possíveis melhorias para o setor mecânico agrícola com sugestões futuras para novos desenvolvimentos de tecnologias de deposição e entrega de sementes em semeadoras de precisão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica tem como objetivo apresentar conceitos e referências sobre os fatores que influenciam a melhoria do sistema de semeadura, incluindo a plantabilidade, bem como a busca por soluções existentes no contexto da qualidade de plantio. A análise de sistemas em máquinas agrícolas e seus aperfeiçoamentos busca mostrar as tecnologias de mercado a fim de demonstrar as evoluções no campo da semeadura.

2.1 FATORES DE INFLUÊNCIA SOBRE A ENTREGA DE SEMENTES

O trabalho é qualificado como pesquisa aplicada, pois busca através de fontes externas tratar sobre coleta de conhecimento previamente estabelecido para entender o grau de definição de melhorias nos processos que influenciam na semeadura. A análise fornece requisitos de projetos de semeadora e suas tecnologias envolvendo a contextualização sobre o sistema de plantio direto e a semeadura na agricultura de precisão.

De acordo com Conte (2017), plantabilidade é sinônimo de precisão no plantio, ou seja, é a quantidade de semente com o mesmo espaçamento por área e com a mesma profundidade. Para isso, características são delineadas a partir da categoria de máquinas existentes no mercado, influenciado pelo desenvolvimento de soluções técnicas de semeadora precisa. A definição de fatores de influência no projeto é feita em classes no seu mais alto nível, e a caracterização das soluções existentes é uma dessas classes (MARINI, 2007). Dentre os principais fatores para o atingimento de um plantio preciso está a deposição de sementes no sulco com a mesma profundidade de forma equidistante sem falhas, deposição de fertilizante na profundidade e quantidade especificada e proporcionar o contato da semente no solo de forma adequada para que seja possível o alcance de uma excelente germinação.

2.1.1 Entrega da semente

Busca-se na semeadura oferecer às sementes as melhores condições de clima e nutrição que estas precisam para se desenvolver com o maior vigor possível e oferecer na colheita os melhores índices de produtividade. De acordo com Kolchinski *et al.* (2005), o vigor está diretamente relacionado com a deterioração das sementes, a deterioração por sua vez pode ser compreendida como sendo a perda da capacidade da semente em produzir uma plântula normal, ou seja, quanto maior o vigor da semente, menor sua deterioração, o mesmo processo pode ser entendido de forma recíproca.

A qualidade da cultura é um dos mais importantes fatores que influenciam para o sucesso da evolução das culturas agrícolas. Segundo o Laboratório de Análise de Sementes (2020), o vigor de um lote de semente é a capacidade de germinação de forma rápida e uniforme, para o desenvolvimento de plântulas normais sob grandes diversidades de condições ambientais. Entre alguns fatores que as plantas com alto vigor apresentam é a capacidade quando submetidas a situações de déficit hídrico após a semeadura, a compactação superficial do solo, semeadura realizada com profundidades maiores ou até ataque de patógenos de solo. A combinação entre a qualidade de semente, a plantabilidade e o processo uniforme de semeadura é a base da produtividade na lavoura (FARIA; LADGRAF, 2022).

De acordo com Neto *et al.* (2022), a utilização de sementes de alta qualidade indica um aumento na produtividade de 10% em plantios com sementes de alto vigor. Essa importância torna-se ainda mais visível tratando de forma numérica, como mostrou Neto quando calculou as perdas geradas por uma planta de soja a menos por metro quadrado. Logo, os resultados obtidos são expressivos, a cada falha por metro quadrado causa perda de 180 a 240 Kg de soja por hectare, fato que demonstra o quanto o produtor está deixando de ganhar por área.

2.1.1.1 Composição do solo

Segundo Santos (2018), há um sistema brasileiro de classificação de solos que atua desde 1999, no qual são agrupados em categorias, conforme propriedades em comum, e recebem designações próprias e condizentes a etapa atual de conhecimento científico, ou seja, os solos são classificados com base em propriedades que resultam dos processos de gênese do solo, e o processo de formação.

Os solos brasileiros são divididos pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos em 13 ordens, como apresentado no Quadro 1, que se refere às classes, os termos de conotação, origem da denominação e a área presente no Brasil.

QUADRO 1 Classes de solos encontradas no Brasil de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.

Classe (ordem)	Termos de conotação ou memorização	Origem do nome	Área no Brasil(1)
Latossolos	Solos velhos (muito alterados em relação à rocha de origem), profundos, com grande desenvolvimento do horizonte B.	Do latim lat (material muito alterado).	31,6%
Argissolos	Solos com acumulação de argila no horizonte B.	Do latim argilla (argila)	26,9%
Neossolos	Solos jovens em início de formação (sem presença de horizonte B).	Do grego neo (novo).	13,2%
Plintossolos	Solos com acumulação de ferro em algum horizonte, causando endurecimento.	Do grego plínthos (tijolo).	7,0%
Cambissolos	Solos que possuem horizonte B em estágio inicial de formação.	Do latim cambiare (trocar, mudar), indicando que este solo já é mais desenvolvido que o Neossolo.	5,3%
Gleissolos	Solos com cores acinzentadas.	Do russo gley (глей) (massa de solo pastosa), devido à usual pegajosidade.	4,7%
Luvissolos	Solos jovens com acumulação de argila no horizonte B e alta fertilidade química natural.	Do latim luere (lavar) devido à perda de argila da superfície	2,9%
Espodossolos	Solos com alto teor de areia, que apresentam horizonte B que acumula matéria orgânica.	Do grego spodos (cinza vegetal).	2,7%
Planossolos	Solos com acúmulo de argila no horizonte B, que geralmente tem cores acinzentadas.	Do latim planus (plano).	2,7%
Nitossolos	Solos velhos com horizonte B com estrutura desenvolvida com superfícies brilhantes no horizonte B.	Do latim nitidus (brilhante).	1,1%
Chernossolos	Solos jovens, com razoável conteúdo de matéria orgânica e alta fertilidade química natural.	Do russo chernyy (negro)	0,4%
Vertissolos	Solos jovens, que formam fendas pronunciadas quando secos, com elevada fertilidade química. Tem elevada capacidade de expandir (molhados) ou contrair (secos).	Do latim vertere (inverter), devido à presença das fendas que permitem a mistura dos horizontes no perfil de solo.	0,2%
Organossolos	Solos com altos teores de matéria orgânica, mas baixa fertilidade química.	Do grego organikós, pertinente ou próprio de compostos de carbono	0,03%

Fonte: Santos (2018).

A partir do Quadro 1, é possível verificar os solos predominantes em áreas nacionais, sendo o conjunto entre Latossolos, Argissolos e Neossolos que se distribuem em aproximadamente 70% do território brasileiro.

Os Latossolos são solos geralmente profundos entre 1 a 2 metros, grandemente intemperizados e normalmente com baixa fertilidade. Normalmente encontrado em áreas mais planas e bem drenadas. De acordo com Santos *et al.* (2011), os Latossolos predominam cerca de 31,6% do solo brasileiro, e é considerado o principal solo existente no país. Embora seja um solo com baixa fertilidade química, apresenta ausência de pedras, grandes porosidades, boa drenagem e permeabilidade, isso faz com que seja muito utilizado na produção rural, a partir da adoção de práticas de adubação e correção realizadas pelos produtores, o que torna o solo com maior capacidade produtiva.

Os Argissolos são solos com acúmulo de argila no horizonte B, e apresentam coloração amarelada, cinzenta, vermelha ou vermelho amarelado. Segundo, Santos *et al.* (2011), esse solo predomina cerca de 26,9% do solo brasileiro. Por ser um solo com relevos moderadamente declivosos e apresentar baixa capacidade de retenção de nutrientes além de apresentar maiores riscos de ocorrência de erosão. Em conformidade às limitações relacionadas, a sua utilização para agricultura exige um manejo adequado com adoção de correção, adubação e práticas conservacionistas para controle da erosão.

Os Neossolos são solos rasos e pouco evoluídos constituídos por materiais minerais e por materiais orgânicos com menos de 20 cm de espessura. Esse solo apresenta apenas horizonte A sobre o horizonte C e não evidencia nenhum tipo de horizonte B. Conforme Santos *et al.* (2011), esse solo predomina cerca de 13,25% do solo brasileiro. São solos preferencialmente utilizados para preservação de flora e fauna, apesar de ser comumente utilizado como pastagens em pequenas propriedades rurais, pelo fato de haver relevos em declives e o predomínio de pedras.

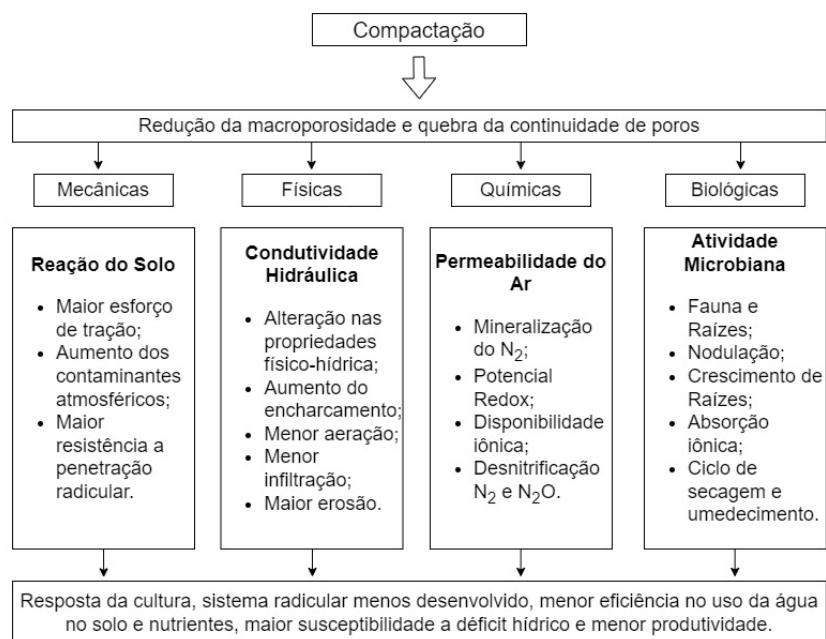
É possível a verificação destas proporções através do Mapa de Solos do Brasil segundo Embrapa (2011), onde as classes de solos são predominantes nas unidades de mapeamento. A soma referente a área do Brasil em porcentagem não é de 100%, pois o Mapa de solos do Brasil também abrange áreas onde não há predominância de solos, por exemplo áreas de corpos hídricos, elevações rochosas e dunas.

O sistema de manejo do solo através do plantio direto adaptou-se bem às condições de solo e clima brasileiro, valorizando a produtividade de culturas como soja, milho, trigo e cevada. O aumento da produtividade conseguinte através desta ferramenta de plantio foi a integração de diversos fatores tais como aumento da matéria orgânica do solo, contribuindo para a diminuição da erosão do solo.

Segundo Henning *et al.* (2021), o manejo do solo é uma das etapas mais importantes que antecede a semeadura. Quando realizado corretamente, auxilia na redução da erosão e conseqüentemente as perdas de solo e nutrientes, melhora a biodiversidade, diminuindo a incidência de pragas e doenças, e preservando a matéria orgânica do solo. Estes fatores auxiliam na estabilidade das características físicas do solo, a estrutura, compactação, porosidade e retenção a água. Estes aspectos determinam o melhor assentamento da semente em semeadura e o aprofundamento do sistema radicular da planta em desenvolvimento.

De acordo com Silva (2003), tem ocorrido um aumento na compactação dos solos agrícolas, o que se torna um fator limitante para o aumento da produtividade e para a sustentabilidade do sistema de plantio direto, principalmente em solos argilosos. Apesar dos benefícios obtidos com o sistema de plantio direto, há trabalhos que indicam um aumento do estado de compactação dos solos submetidos a esse sistema (REINERT, 1990). Diante disso, o fato do aumento da compactação é visto como sendo um fator gerado pelas pressões causadas pelo tráfego de máquinas e a acomodação natural das partículas acaba por elevar o estado de compactação do solo. A Figura 1 ilustra uma representação da influência da compactação nas funções desempenhadas pelo solo.

FIGURA 1 - Representação da influência da compactação nas funções desempenhadas pelo solo



Fonte: Santi *et al.* (2016).

Em conformidade com Negi (1980), a compactação do solo ocasiona o aumento da densidade do solo, aumento da resistência à penetração radicular da planta, redução da aeração, alteração de fluxo de calor além de afetar na permeabilidade do solo, infiltração de água e propriedades ligadas a porosidade. Logo, a redução do teor de água no solo aumenta sua resistência à penetração, resultando em um crescente obstáculo mecânico para o crescimento das raízes em expansão.

O aumento do peso das máquinas agrícolas, juntamente com o aumento da intensidade de tráfego no campo, resulta na formação de camadas compactadas no solo. Isso modifica a sua estrutura e prejudica o desenvolvimento das culturas, levando a uma redução na produtividade, especialmente durante anos com ocorrência de déficit hídrico severo. A compactação no sistema de plantio direto é influenciada pelas características das máquinas, como peso e área de contato com o solo, quantidade de tráfego e teor de água. As camadas compactadas na superfície são originadas pela pressão de contato entre o pneu e o solo, enquanto as camadas abaixo de 0,3 m estão relacionadas ao peso total exercido sobre o rodado. Em ambos os casos, a compactação só ocorre se a tensão exercida pelos rodados ultrapassar a resistência do solo à deformação (SANTI *et al.* 2016).

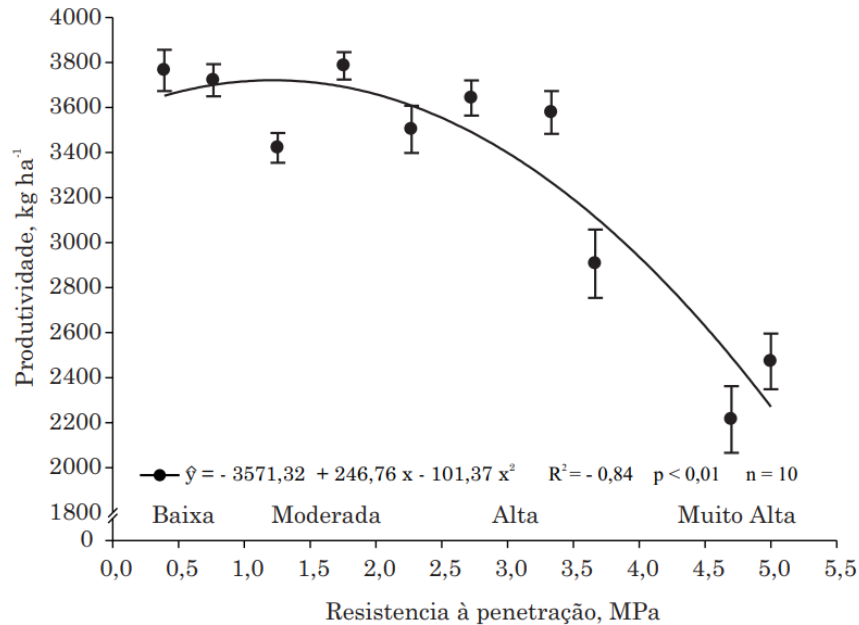
2.1.1.2 Resistência do solo

O solo apresenta uma certa resistência mecânica à penetração das raízes que é entendida como uma resistência física que o solo exerce sobre as raízes das plantas ao se mover através dele. De acordo com Mazurana *et al.* (2013), essa resistência é influenciada diretamente pela densidade, a porosidade e principalmente pela umidade do solo.

A ausência da rotação de culturas adequada, aliada ao uso maior de máquinas com maior rendimento operacional, entre outros fatores, têm contribuído para a compactação do solo. Isso acaba restringindo o desenvolvimento radicular das culturas nas camadas superficiais do solo e reduz os ganhos produtivos. Segundo Colombi *et al.* (2018), solos onde há altos valores de resistência mecânica do solo à penetração há alteração na dinâmica de repartição de água no solo, de forma negativa, o que leva a diminuição da zona de influência das raízes, dificultando a produção e desenvolvimento das culturas, desta forma encontrar maneiras de diminuir a resistência do solo à penetração, tenderá em uma melhora na produtividade da cultura econômica.

Conforme Girardello *et al.* (2014), a produtividade da cultura da soja é influenciada pela ação da resistência à penetração do solo na fase de plantio. A Figura 2 ilustra a produtividade da cultura da soja em função da resistência da penetração, determinada após o manejo da cultura de cobertura, em Latossolo Vermelho.

FIGURA 2 - Produtividade da cultura da soja em função da resistência da penetração



Fonte: Girardello *et al.* (2014).

2.1.1.3 Disponibilidade de nutrientes

Com a mudança no sistema do preparo convencional para o sistema de semeadura direta, desencadeou-se uma série de alterações nas propriedades químicas e físicas do solo, principalmente quanto à disponibilidade de nutrientes e ordenamento do cultivo. A disponibilidade de nutrientes é a quantidade do nutriente que pode ser absorvida pela cultura durante seu ciclo de vegetação (SILVA, 2005). Sabe-se que esses nutrientes são fundamentais para o crescimento, desenvolvimento e produção das plantas. São divididos em macronutrientes e micronutrientes.

Os macronutrientes são: Nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), presente em maiores quantidades no solo, enquanto os micronutrientes são: ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), boro (B), molibdênio (Mo) e cloro (Cl), os quais apresentam-se em quantidades menores.

A disponibilidade de nutrientes pode ser afetada por vários fatores, desde pH do solo, teor de matéria orgânica, textura do solo, temperatura, umidade e atividade biológica. Além disso, práticas inadequadas de manejo do solo, como por exemplo a remoção excessiva de nutrientes do solo através da colheita ou a falta de reposição e correções de nutrientes através de práticas de adubação também afetam o desempenho da disponibilidade nutricional do solo. Por isso, é essencial o manejo adequado dos nutrientes, para garantir disponibilidade efetiva para as plantas e por consequência aumentar a produtividade da cultura.

Dessa forma, a disponibilidade de nutrientes é uma medida responsável para avaliar a fertilidade do solo e a capacidade do fornecimento de nutrientes para as plantas cultivadas. Considera-se o manejo de nutrientes o fator chave para uma alta produtividade agrícola, desse modo, a manutenção adequada de nutrientes pode ser alcançada através de práticas como adubação, correção de solo, rotação de culturas e melhores práticas de conservação de solos.

2.1.1.4 Definição de população de plantas por área e suas características físicas

A densidade de semeadura da soja é um dos fatores primordiais para atingir altas produtividades e a rentabilidade desejada. Para que seja possível, o melhor aproveitamento dos nutrientes no solo o arranjo espacial ideal deve ser respeitado. Dessa forma, há possibilidade de estimar a densidade de semeadura por metro linear e a quantidade total de sementes necessárias para realização do plantio de determinada área.

Até a década de 1980, a cultura da soja era cultivada com 400.000 plantas · ha⁻¹ ou mais. O grande número de plantas visava garantir maior competição entre plantas, aumentar a altura e sombrear o solo em menos tempo para competir com as plantas daninhas. Após o advento dos herbicidas de pós emergência, essa razão perdeu importância. O melhoramento do potencial genético das sementes proporcionou a obtenção de uma população de plantas mais uniformes o que contribuiu para a redução da população de plantas em soja para aproximadamente 300.000 plantas · ha⁻¹ (EMBRAPA, 2013).

Os resultados de espaçamento entre as fileiras de plantas apresentam-se mais favoráveis para distâncias menores. Atualmente, a utilização de semeadoras presente no mercado é comercializada com espaçamentos entre 40 cm, 45 cm e 50 cm para semeadura de soja. O Quadro 2 apresenta a correspondência entre a população de plantas / ha, o espaçamento entre fileiras e os números de plantas por metro, para as distâncias de espaçamentos mais utilizados.

QUADRO 2 - População de plantas de acordo com espaçamento entre as fileiras e o número de plantas por metro linear.

Espaçamento (cm)	Plantas / metro linear						
	6	8	10	12	14	16	18
40	150.000	200.000	250.000	300.000	350.000	400.000	450.000
45	133.333	177.777	222.222	266.000	311.111	355.555	400.000
50	120.000	160.000	200.000	240.000	280.000	320.000	360.000

Fonte: Elaborado pelo autor (adaptado de EMBRAPA, 2013).

Além disso, o número de plantas por metro linear pode ser calculado como sendo:

$$NS = \frac{PP \cdot ES}{10.000} \quad (2.1)$$

O desenvolvimento da análise da trajetória da semente, envolve alguns fatores essenciais como, por exemplo, a massa da semente e sua geometria, porém, são variantes que dependem da variedade da semente, densidade e formato (volume) distintos. Vários estudos identificam a existência das variações no peso de 1000 grãos, de acordo com cada cultivar. Segundo Mendes (2023), o valor do peso de mil sementes (PMS) fica na faixa de 140 g a 220 g a cada 1000 sementes de soja.

O formato geométrico da semente pode sofrer variações conforme a cultura. Segundo Krzyzanowski *et al.* (2008), existe uma grande variedade de tamanho de sementes de soja, as quais normalmente são classificadas em diferentes tamanhos de peneira, podendo variar de 5 mm a 8 mm. Normalmente, o tamanho das sementes utilizadas para semeadura de soja em escala comercial varia entre 5,5 mm e 6,5 mm, conforme a classificação das peneiras.

Para este estudo, considera-se o valor médio de 180 g para mil sementes de soja, ou seja, como o estudo é realizado por um sistema de individualização de sementes o valor da massa de uma única semente é 0,18g o que equivale a 0,00018 kg por semente. Já quanto ao seu formato esférico, considera-se para fins de modelagem uma esfera perfeita com dimensões de 6,5 mm de diâmetro, ou seja, 0,0065 m.

2.1.1.5 Colisões e o coeficiente de restituição da semente de soja

O coeficiente de restituição é uma grandeza adimensional, que demonstra os modos de colisões que acontecem entre os corpos. Esse valor é determinado pela Equação (2.2) que é a relação entre as velocidades de afastamento da partícula e a velocidade de aproximação antes da colisão ocorrer.

$$e = \frac{V_{af}}{V_{ap}} \quad (2.2)$$

Nesse contexto, é importante ressaltar que a semente de soja ao ser conduzida pelo tubo condutor, pode vir a sofrer colisões até a sua chegada no solo, o que interfere diretamente na integridade da entrega homogênea do espaçamento entre plantas. Dessa forma, buscou-se por meio de pesquisas experimentais identificar qual o coeficiente de restituição da semente da soja, pois é com ele que será possível analisar a dinâmica da semente pelo interior do tubo condutor.

De acordo com Horabik *et al.* (2017), determinaram os coeficientes de restituição de sementes de ervilha, soja e colza, para diferentes valores de umidade. Dentre as variações de umidade, foram observadas a influência da velocidade de impacto dentro do intervalo de velocidade de 0,17 e 8,8 m/s. Com isso, foram obtidos os coeficientes através do teste de queda livre em uma placa de mármore, com auxílio de câmera de alta velocidade. As considerações realizadas para os resultados do teste é que a trajetória vertical da semente tinha desvio inferior a 15° sem rotação da partícula. Contudo, os resultados indicaram a diminuição do coeficiente de restituição de ambas as sementes com o aumento do teor de umidade e com o aumento da velocidade. Portanto, definidos como resultados finais, o coeficiente de restituição para a semente de soja com umidade de 15% do peso total cujo são parâmetros essenciais para uma germinação completa é definido em (0,604 +/- 0,056).

Dessa forma, o estudo se desenvolve através do coeficiente de restituição obtido no estudo de Horabik *et al.* (2017), assumindo o valor fixo para modelagem dinâmica da semente dentro do tubo como 0,604 para o coeficiente de restituição da semente de soja por colisão dentro do tubo.

2.1.1.6 Variações de velocidades de semeadura

A velocidade na operação de semeadura tem influência direta sobre a cobertura das sementes, uniformidade de distribuição, estande de plantas e conseqüentemente a produtividade (REVISTA CULTIVAR, 2020). A velocidade de plantio depende de vários fatores, como tipo de solo, de máquina, umidade e compactação da área. Em média, a velocidade de plantio no Brasil fica por volta dos 5 km/h, variando entre 4 e 6 km/h.

Na literatura não é recomendado ultrapassar a velocidade ideal, mas há uma série de aspectos decisivos do produtor, pois dependendo da sua área produtiva, é necessário aumentar a velocidade para que o plantio ocorra na janela da cultura.

2.2 REQUISITOS DE PROJETO DAS SEMEADORAS

Os requisitos de projetos constituem-se na primeira decisão física sobre o produto que se deseja projetar (FONSECA, 2000). Por essa razão, busca-se sistematizar procedimentos que levam a obtenção de requisitos e conseqüentemente especificações que atendam ao problema de projeto a ser solucionado.

2.2.1 Parâmetros mecânicos de plantabilidade

A plantabilidade de uma lavoura equivale a precisão do plantio, em especial quanto a distribuição das sementes. No que lhe diz respeito, a plantabilidade é uma condição que deve ser alcançada como resultado do processo de plantio bem feito. Para isso, faz-se necessário as devidas regulagens da semeadora, para que se reproduza os parâmetros de plantio esperados como espaçamento e densidade por hectare. Um fato importante relatado por Rambo *et al.* (2003), é que a melhor distribuição de plantas na área semeada pode contribuir para o aumento da produtividade, pois permite o aproveitamento da umidade, da luz solar e dos nutrientes disponíveis no solo.

A abordagem sobre o desenvolvimento de semeadoras precisas considera métricas de capacidade e eficiência, como também avalia recursos funcionais disponibilizados pelo propósito das soluções para otimizar a entrega de parâmetros de atuação de semeadura. Com isso, é possível desdobrar cada cadeia de funções e agrupá-las em conjuntos a fim de, consolidar a definição de uma estrutura de funções aplicada a semeadoras precisas.

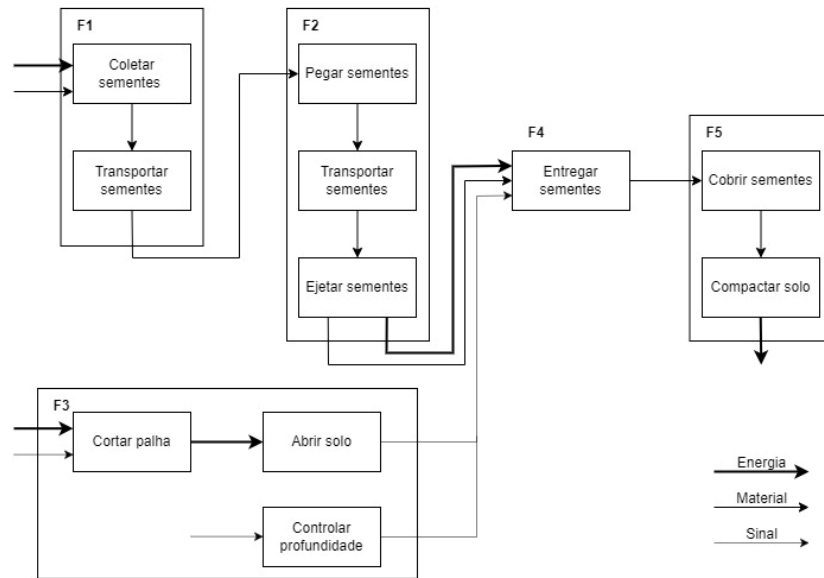
Nesse contexto, a verificação dos requisitos aplicáveis ao projeto pode ser orientada pelas características e os fatores que influenciam na qualidade da semeadura. Esses fatores são percebidos como fatores de influência no projeto de Romano (2003), e no projeto de Marini (2007), pela caracterização de diversos elementos presentes no meio onde as máquinas agrícolas estão inseridas, que influenciam o desempenho da operação.

A identificação das funções essenciais de uma semeadora foi feita por Reis; Forcellini (2002), em seu estudo conceitual de semeadoras comercializadas no Brasil. A metodologia utilizada, dividiu o processo de projeto em: projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado, por meio de uma análise dos mecanismos e informações disponíveis em guia do usuário ou catálogos do produtor, sem necessidade de testes em campo e desmontagem de componentes.

Dessa forma, os autores salientam a importância da dosagem e condução da semente até o fundo do sulco, que normalmente é realizada com auxílio da gravidade sobre a semente, enquanto em alguns casos por jato de ar dentro do tubo condutor. Do ponto de vista de semeadoras, Stefanello (2014), estabelece a função global de uma semeadora manual, considerando aplicação de metodologia de projeto de produto, assim como mencionado no trabalho de Reis & Forcellini (2002), mostrada na Figura 3. Este desenvolvimento, teve como função global “semear com precisão e qualidade”, ou seja, adequando todas as situações relacionadas às funções e restrições da semeadora, as quais originam de possíveis necessidades, desejos e restrições dos usuários.

Contudo, a função “F2 dosar sementes” está relacionada com o mecanismo dosador de semente, cujo o mesmo apresenta subfunções atribuídas a sua função principal, na qual tem como objetivo a individualização das sementes. Já a função “F4 entregar sementes” refere-se ao mecanismo de condução da semente após ocorrer o processo de individualização. Essas funções influenciam diretamente na dinâmica da trajetória da semente, deste a dosagem até a entrega ao sulco de semeadura.

FIGURA 3 - Funções parciais de uma semeadora de precisão



Fonte: Reis; Forcellini (2002).

As definições das funções essenciais da semeadora possibilitam estabelecer a função global e estrutura funcional em diagramas de blocos de uma semeadora através de sistemas técnicos existentes. Estes sistemas podem ter relações aproximadas com a identificação dos requisitos de projeto, de modo que a estrutura funcional seja conhecida e o problema principal reside na descoberta de melhores soluções (REIS, 2003).

2.2.1.1 Estabilidade do carro de linha da semeadora

Quanto aos parâmetros mecânicos de plantabilidade, as semeadoras atuais, visam proporcionar novas estratégias de contato eficaz dos carros de linha com o solo. As funções de trabalho exercidas sobre o leito de semente são exercidas por uma mola associada ao movimento das barras de ferramentas fixadas nos carros de linha, as quais atuam no corte, separação da palhada, trabalho de sulco e depósito de fertilizante. Considerando as semeadoras de precisão, essas atuam com aplicação e carga descendente a partir do carro de linha de semeadura sobre o solo. Esses sistemas operam com elementos pneumáticos e hidráulicos controlados de maneira variável em pressão, vazão e carga, ou seja, um controle de precisão de força aplicada linha a linha, dessa forma é possível compensar as variações de relevo do solo a fim manter a precisão de profundidade de plantio.

A tecnologia empregada em semeadoras de precisão é o *Downforce*, cujo sistema é apresentado na Figura 4, e seu conceito baseia-se na leitura em tempo real da força resultante gerada por meio da força descendente total na linha da semeadora, força de atuação nas rodas de fechamento de sulco, força de reação nas rodas reguladoras e a força de reação nos discos de abertura do sulco. Isso auxilia para que a linha de plantio sempre deposite a semente na profundidade desejada, sem que ocorra compactação do sulco ao redor da semente, além de minimizar os efeitos de vibrações no carro de linha da semeadora, (SHARDA *et al.* 2017).

FIGURA 4 – Modelo exemplificado da funcionalidade do downforce



Fonte: (SHARDA *et al.* 2017)

Segundo Jing *et al.* (2020), em uma análise comparativa entre ajustes de profundidade de plantio com a utilização de molas e sistemas de controle de ajuste de força descendente resultou em uma melhoria de 1,05-2,23% quanto a aplicação de força descendente. Além disso, os resultados mostraram que o sistema de controle de downforce melhorou a qualidade de emergência do cultivo em relação aos tratamentos experimentais utilizados, aumentando de 3,12 a 34,38%. Portanto, concluiu que as diferentes condições de solo e profundidade de semeadura, a utilização de downforce adequado com um sistema de controle desenvolvido pode gerar melhor qualidade de trabalho do que os resultados com molas tradicionais.

2.2.1.2 Equidistância

De acordo com Horbe; Grave (2021), a variabilidade na produtividade entre as plantas é ocasionada por problemas na distribuição na linha de plantio. Os autores demonstraram graficamente os resultados para máximo potencial produtivo para cada centímetro de distância adequado em um estudo com duas variedades de sementes de soja, Lança¹ e Zeus², que representaram uma penalização na produtividade de 96 kg ha⁻¹ e 116 kg ha⁻¹ respectivamente para cada centímetro acima do adequado, ou seja perda de produtividade de grãos por hectare, para cada centímetro de espaçamento longitudinal entre plantas além do adequado.

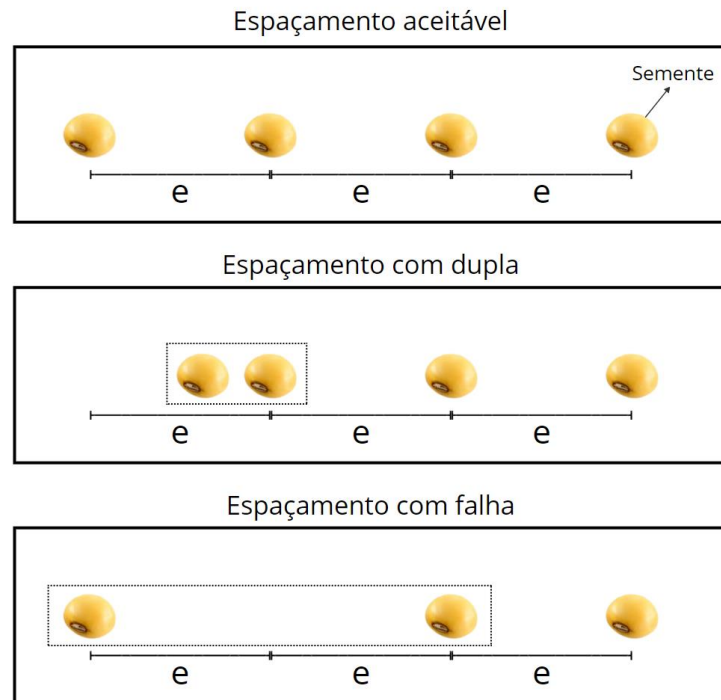
Para que se garanta bons resultados na lavoura é muito importante que haja uma boa semeadura com uma excelente distribuição de sementes. A partir disso, a plantabilidade é fundamental para o aumento da produtividade e rentabilidade do produtor. Silva (2022), definiu o conceito de plantabilidade, como sendo a capacidade de distribuir sementes no sulco de plantio uniformemente, com a máxima equidistância possível e na profundidade adequada, com objetivo de atingir o estande desejado de plantas.

Os valores de espaçamento aceitável são considerados quando o valor correspondente está entre 0,5 e 1,5 vezes o espaçamento nominal. Espaçamento com duplas é quando a distância entre sementes é menor que 0,5 vezes o espaçamento nominal e espaçamentos com falhas representam distâncias entre sementes maior que 1,5 vezes o espaçamento nominal (MARTIN *et al.* 2022). As variações de disposições de distribuição de sementes são apresentadas na Figura 5.

¹ Lança: nomenclatura utilizada para uma determinada variedade de semente de soja.

² Zeus: nomenclatura utilizada para uma determinada variedade de semente de soja.

FIGURA 5 – Variações na distribuição das sementes



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Mercante *et al.* (2005), a uniformidade de distribuição longitudinal de sementes é uma das características que mais contribuem para um estande adequado de plantas e para a melhoria da produtividade das culturas. Rambo *et al.* (2003) afirma que, o espaçamento equidistante de plantas resulta em menor competição intraespecífica e conseqüentemente aumenta o rendimento.

A precisão na distribuição de sementes pelo mecanismo dosador de semente influencia diretamente no aumento da produção, ou na perda de precisão se a regulagem de plantio não estiver de acordo com a cultivar do plantio. Segundo Grün *et al.* (2021), avaliaram a uniformidade da distribuição das sementes de acordo com a variação de velocidade de plantio, e concluiu que o aumento da velocidade de semeadura proporciona maior desuniformidade de distribuição com aumento de espaços falhos e múltiplos bem como redução na percentagem de espaçamentos aceitáveis. Esse parâmetro de velocidade também foi avaliado por Brandelero *et al.* (2015), no qual afirmaram que o aumento da velocidade de semeadura afetou a deposição vertical e longitudinal da semente, contribuindo para a redução da produtividade.

2.2.1.3 Execução do sulco

O desempenho dos componentes de abertura do sulco das semeadoras é fundamental para obtenção de boa produtividade. De acordo com Francetto *et al.* (2015), os aspectos mais relevantes relacionados com o desempenho do processo de semeadura referem-se ao corte eficiente da palha presente na superfície, abertura de sulco e a colocação da semente e fertilizante na profundidade correta em contato com o solo.

No Brasil, os tipos de sulcadores mais utilizados são os de discos duplos e os do tipo haste. O uso de hastes sulcadoras para a deposição de fertilizantes em detrimento dos discos duplos cresceu entre os agricultores (MODOLO *et al.* 2005). Basicamente, pelo fato de que o mecanismo do tipo haste rompe melhor as camadas compactadas e funciona melhor em solos argilosos, reduzindo o desperdício de tempo e insumos (CONTE *et al.* 2009).

Segundo Reis *et al.* (2006), descrevem em seu estudo que as hastes promovem maior mobilização do solo nos sulcos de semeadura quando comparadas com os discos duplos, podendo elevar a incidência de ervas daninhas e a possibilidade de erosão, mas por outro lado, exigem menos pressão para penetração no solo. Já os sulcadores do tipo disco duplo imprimem ao solo forças laterais que tendem a formar um sulco uniforme em forma de “V” garantindo uma profundidade uniforme de semeadura e um bom contato entre a semente e o solo.

2.3 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS SEMEADORAS

No ano de 1960 nos Estados Unidos da América, surgiu um programa denominado de Revolução Verde com o objetivo de aumentar a produção e fertilização utilizando máquinas no campo e diminuindo o trabalho do homem, adentrando a tecnologia no campo (ALVES *et al.* 2013).

No Brasil, o emprego das novas técnicas foi realizado a partir de incentivos governamentais, no qual se idealizava expandir a capacidade dos produtores rurais para que produzissem cada vez mais, inclusive em regiões onde o solo era pobre e ácido. O principal objetivo era garantir maior segurança alimentar, por meio da aplicação de métodos de cultivo e tecnologia para aumentar a produção de alimentos.

2.3.1 Surgimento do plantio direto

A definição de plantio direto nos EUA foi introduzida nos anos 60, enquanto no Brasil o sistema de plantio direto surgiu na década de 70, através do agricultor pioneiro Herbert Arnold Bartz, na região de Rolândia, no norte do Paraná, como mostra a Figura 6. Este sistema emergiu a partir da percepção dos prejuízos significativos que os cultivos da época sofriam em função da ocorrência da erosão no solo em momentos de muita chuva, uma vez que este era deixado solto pelo preparo do solo em plantio convencional.

FIGURA 6 - Semeadora Allis Chalmers importada dos EUA para iniciar o Plantio Direto no *Brasil*



Fonte: Acervo de Herbert Bartz (2018).

O plantio direto na Palha é um sistema de produção agropecuária em que se evita a perturbação do solo e se mantém sua superfície sempre recoberta de resíduos, ou seja, palha e/ou de vegetação de culturas anteriores, para isso pequeno sulco ou cova é aberto com profundidades e larguras suficientes para garantir a adequada cobertura e contato da semente com o solo.

De acordo com Carvalho; Freitas (2018), a palha presente sobre a superfície ajuda a proteger o solo contra o impacto das gotas de chuva, reduzindo a desagregação e o selamento da superfície, garantindo maior infiltração de água e menor arraste de terra. Carvalho e Freitas também afirmam que o plantio direto reduz em até 90% as perdas de terra por causa da erosão e até em 70% a enxurrada.

No ano de 1977, a empresa *Semeato* que já vinha vendendo semeadora convencionais iniciou a comercialização de um kit de discos de cortes para adaptar nos seus modelos de semeadora com objetivo de aplicação em plantio direto, e em 1982 lança então seu primeiro projeto de semeadora destinada ao plantio direto. Enquanto isso, em 1983 a SLC inicia a produção de semeadoras no Brasil, juntamente com a participação da *John Deere*. Na década de 90 entram para o mercado o lançamento de semeadoras com distribuidor de sementes através de discos alveolados, o qual melhorou consideravelmente a precisão na distribuição de sementes das semeadoras da época (ANZILIERO, 2021).

De forma geral, o plantio direto é a forma de manejo do solo conservacionista na qual envolve técnicas recomendadas para aumentar a produtividade, conservando ou melhorando continuamente o ambiente. Goulart (2019), recomenda três princípios básicos: não revolvimento do solo, formação de palha e rotação de culturas.

A Figura 7 mostra a evolução detalhada da área sob plantio direto no Brasil até o ano de 2018.

FIGURA 7 - Evolução da área sob plantio direto no Brasil



Fonte: Federação Brasileira do Sistema Plantio Direto (2021).

A Federação Brasileira do Sistema Plantio Direto demonstra a evolução da área sob plantio direto no Brasil, no qual em 1972 inicia-se o manejo de plantio direto com zero hectares, esta prática chegou a 230 mil hectares no ano de 1982, 1 milhão e trezentos e cinquenta mil hectares em 1992; mais de 18,7 milhões de hectares em 2002 e, em 2018, atingindo a surpreendente marca de mais de 33,06 milhões de hectares.

2.3.2 Semeadura de precisão

De acordo com Anziliero (2021), na década de 90 ocorreram várias mudanças nas tecnologias das semeadoras, com as invenções dos discos alveolados e os chassis mais reforçados para atender a necessidade da maior compactação ocasionada pelo sistema utilizado do plantio direto. No ano de 2002 entraram no mercado de máquinas agrícolas as novas tecnologias de dosadores a vácuo de sementes, através das empresas *John Deere*, *Semeato* e *Jumil*. Além disso, em mesma época avançaram os desenvolvimentos em tecnologias de mecanismos dosadores de fertilizantes de alta precisão.

Semeadora é toda máquina agrícola cuja função é acomodar no solo os mais variados tipos de sementes, de acordo com a densidade, espaçamento e profundidade recomendada para o desenvolvimento produtivo da cultura, sem que as sementes sofram danos ao percorrer pelos mecanismos de dosagem e condução do sistema e distribuição da semeadora (CONTE, 2017). Dessa forma, é importante mensurar a relevância da operação de semeadura, pois uma vez que a semente e o fertilizante foram distribuídos no solo, caso haja alguma adversidade ou erro de operação, não existe chance de correção no mesmo ciclo da cultura.

Atualmente, as semeadoras adubadoras são as máquinas agrícolas que mais incorporam tecnologia. São equipamentos projetados para permitir a obtenção de uma regularidade de profundidade, alinhamento e espaçamento perfeito, além de uma economia de semente e uma maior rapidez de trabalho. A eficiência das semeadoras está diretamente ligada aos mecanismos que nela engloba, principalmente os mecanismos de distribuição e condução da semente até o sulco de semeadura, fatores que influenciam na precisão do plantio.

As semeadoras de precisão comercializadas no mercado Brasileiro, dispõem de níveis tecnológicos bastantes heterogêneos, principalmente no que se refere aos mecanismos dosadores de sementes (COELHO, 1996). Normalmente acompanham dois tipos de sistemas para dosagem de sementes, os dosadores mecânicos com discos horizontais perfurados ou o sistema pneumático na qual as sementes são succionadas a partir de um vácuo.

Segundo Moleta *et al.* (2020), afirmam que o sistema dosador pneumático permite dosar com maior eficiência semente a semente, possibilitando deposição com maior assertividade no sulco de semeadura.

De acordo com Rocha *et al.* (1988), as semeadoras-adubadoras são equipadas de diferentes mecanismos de dosagem de sementes, como discos perfurado, rotor acanalado, dedo preensor, copo distribuidor e dosador pneumático, mas de modo geral, seus mecanismos são dispostos a uma distância em relação ao solo que faz com que a semente depois de dosada tenha que percorrer uma distância em queda livre por dentro do tubo condutor até chegar ao solo. Em vista disso, os autores afirmam que essa queda das sementes interfere no desempenho dos mecanismos dosadores.

Para Silva; Kluthcouski; Da Silveira (2000), o deslocamento da semente dentro do tubo condutor é afetado por consequência das vibrações provocadas pela movimentação do carro de linha e da semeadora como um todo, o que gera alteração no tempo de queda livre das sementes até o solo, interferindo na uniformidade do espaçamento no sulco de semeadura. Além disso, os autores salientam que a vibração esteja associada à possibilidade de colisões das sementes ao serem deslocadas até o solo, sendo influenciada por uma componente vertical de velocidade gerada pela aceleração da gravidade e uma componente horizontal decorrente da velocidade de avanço da semeadora. Para estes autores, é necessário minimizar ou eliminar a componente horizontal, possibilitando que o deslocamento da semente seja unicamente vertical para que haja a deposição regular no sulco.

Observado o cenário, Deere & Company (1986) propôs que o tubo condutor deveria ser curvado em sentido contrário ao movimento do dosador de sementes em relação ao solo. Dessa maneira, as sementes seriam forçadas a sair do tubo em uma direção com componente horizontal de velocidade igual e de sentido oposto ao do componente horizontal da velocidade gerada pelo movimento do dosador. Assim, as duas componentes horizontais de velocidades iguais, porém com sentidos contrários tenderiam a anular-se, por consequência as sementes deslocaram ao solo com ângulo de incidência próximo de 90° e velocidade horizontal próxima de zero, sendo assim, evitando colisões das sementes para fora da trajetória de destino da linha de plantio.

De acordo com Alonço *et al.* (2014), avaliaram dois diferentes mecanismos de distribuição de sementes de soja, um dosador pneumático a vácuo e um dosador de disco alveolado horizontal. Foi atribuído a confirmação de que o dosador pneumático apresentou melhor exatidão na distribuição longitudinal, porém, com aumento dos espaçamentos múltiplos e aumento do número de sementes por consequência da alta velocidade com que as sementes são liberadas pelo dosador, o que gera colisões dentro do tubo condutor, o qual direciona a semente ao solo. O dosador de disco alveolado, apresentou baixa exatidão quanto à distribuição, os espaçamentos e as falhas foram superiores comparados ao dosador pneumático. Porém, com o aumento da densidade de alvéolos para alojamento das sementes em ambos os distribuidores, os mesmos obtiveram resultados semelhantes de qualidade de dosagem de sementes.

Nesse contexto, a verificação dos requisitos presentes e aplicáveis em projetos de semeadoras pode ser direcionada analisando os conjuntos de características e propriedades que agregam valor quando a capacidade e a qualidade de trabalho. Os fatores que influenciam o decorrer do plantio e a capacidade de funcionalidade do mecanismo depende da verificação das necessidades de operação agrícola relacionada às características de projeto e características de desempenho (CHRISTIANSON; ROHRBACH, 1986). A partir da obtenção das características e fatores pertencentes ao ciclo de vida das semeadoras-adubadoras em desenvolvimento, o estudo fomenta esforços de engenharia para entregar novas possibilidades tecnológicas no mercado de máquinas agrícolas.

2.3.3 Semeadoras de precisão e semeadoras precisas

A semeadora de precisão, como a representada na Figura 8, corresponde a semeadoras capazes de efetuar a dosagem individualizada de sementes sem considerar qualquer auxílio pneumático e hidráulico controlado por sistema eletrônico embarcado.

FIGURA 8 - Semeadora de precisão



Fonte: Revista Cultivar (2016).

Segundo Casão Junior (2006), semeadora de precisão é definida - com denominação popular de “plantadeiras” - em função da capacidade que tal máquina possui na distribuição de sementes ao longo do sulco de semeadura com distâncias teoricamente homogêneas nas direções transversal e longitudinal.

Por outro lado, as semeadoras precisas, são dotadas de recursos de sensoriamento, processamento e controle que permite manejo localizado e mais preciso de diferentes propriedades de plantio, tais como dosagem de fertilizantes e população de semente, em relação ao usualmente verificado em semeadoras puramente mecânicas. A configuração típica de uma semeadora precisa, pode ser implementada com a inclusão de sistemas de eletrônica embarcada que habilitam funcionalidades de agricultura de precisão desenvolvidas para o plantio.

A Figura 9 exemplifica um modelo de semeadora precisa.

FIGURA 9 - Semeadora precisa



Fonte: Revista Cultivar (2021).

Normalmente, essas máquinas utilizam principalmente dosadores pneumáticos de discos verticais ou dosadores de discos horizontais para individualizar/singularizar as sementes e tubos condutores para conduzir por meio da força da gravidade ou condução ativa de entrega de semente ao sulco de semeadura. Um exemplo de aplicação de tecnologia presente em semeadoras precisas é o sistema de disco dosador pneumático com velocidade variável, independente da velocidade de deslocamento da máquina, que permite variar a população de sementes, ou seja a densidade de sementes por hectare conforme prescrições agrônomicas em mapas de plantio ou dados sensorizados do solo em tempo real.

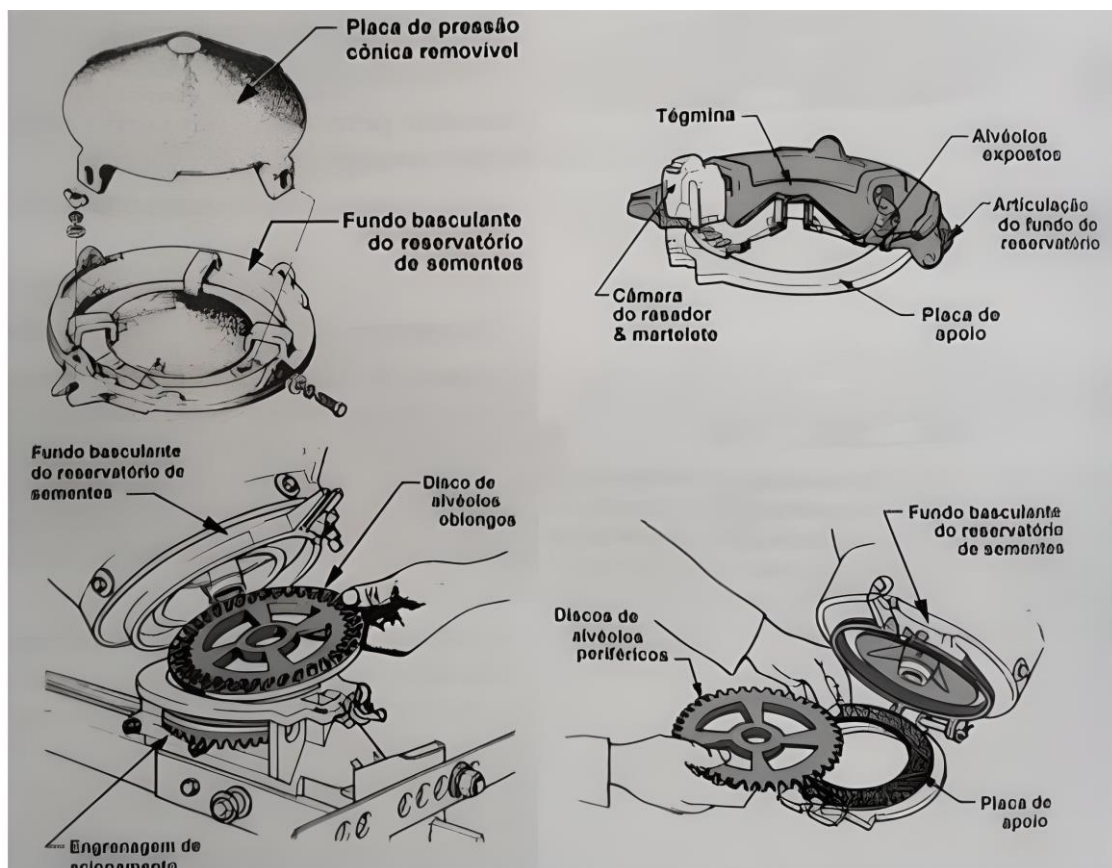
2.4 MECANISMOS DE SINGULAÇÃO DE SEMENTES

Este tópico explora os mecanismos de separação individual de sementes, buscando métodos para individualizar cada semente e detalhando o funcionamento desses dispositivos.

2.4.1 Dosador de semente de disco horizontal

Os sistemas de distribuição de sementes “dosadores”, são responsáveis por individualizar as sementes contidas no reservatório, sem danificá-las, distribuindo-as de maneira uniforme na linha com o máximo de precisão. Uma das tecnologias de mecanismos dosadores de sementes graúdas mais utilizados são os discos horizontais alveolados, como, por exemplo, mostra a Figura 10, que abrange uma grande aplicação em semeadoras de precisão no Brasil.

FIGURA 10 - Dosador de semente de disco horizontal



Fonte: Mialhe (2012).

Esses mecanismos dosadores mecânicos de discos horizontais, são produzidos por uma base fundida que tem função de sustentar o eixo dotado de pinhão e engrenagens de acionamento que atua para realização do movimento do disco dosador. Sobre o disco alveolado há um dispositivo de retenção denominado chapéu chinês, cuja função é limitar a quantidade de sementes que alimentam os alvéolos do disco (PORTELLA, 1997).

Além disso, o dosador possui uma série de elementos que auxiliam na melhoria da distribuição das sementes, como o elemento raspador, cuja função é retirar o excesso de sementes que possa ocorrer durante a captação, deixando apenas uma única semente por alvéolo. Acima da abertura de saída, encontra-se o elemento ejetor, na forma um punção, acionado por uma mola, que penetra no interior do alvéolo, forçando a saída da semente do disco.

Frequentemente, os fabricantes fornecem um conjunto de discos alveolados e engrenagens que são utilizadas para a regulagem da semeadora de acordo com a cultura que será semeada. Além disso, esses elementos de dosagem podem ser encontrados em várias configurações construtivas, porém com funções similares.

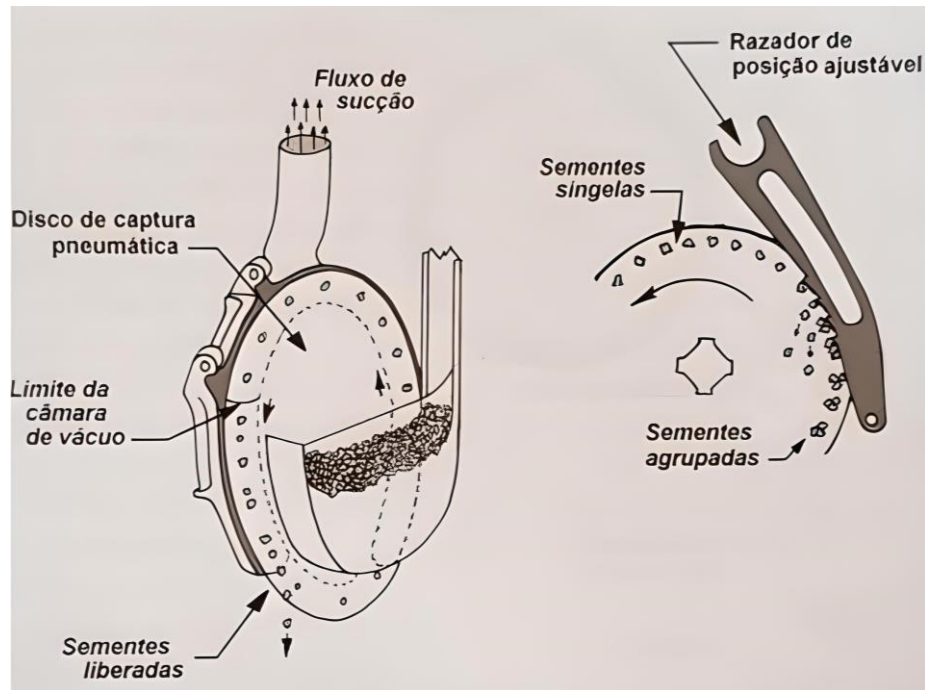
2.4.2 Dosador pneumático

Os dosadores pneumáticos, são um tipo de sistema de distribuição de sementes que possibilitam dosar as sementes uma a uma, visando à maior precisão possível. Uma publicação da EMBRAPA em 2020 referente ao plantio de soja, identificou a comparação entre mecanismos dosadores mecânicos e pneumáticos, concluindo que o modelo a vácuo permite maior velocidade de trabalho sem perder uniformidade na distribuição. Assim, garantindo uma operação mais rápida e com menos perdas.

Conforme Casão Junior (2006), os dosadores pneumáticos normalmente verticais como mostra a Figura 11, capturam as sementes juntos aos alvéolos do disco do dosador através de sucção ou pressão positiva gerada pela turbina geradora presente na semeadora. Há um dispositivo raspador que individualiza as sementes e posiciona apenas uma única semente por alvéolo. Estes mecanismos, normalmente, são alimentados por motores elétricos que fazem a movimentação dos componentes internos do sistema, o que possibilita que quando a semente é capturada sobre o disco através da sucção seja liberada, quando chega próxima ao tubo condutor de descarga, onde o vácuo ou pressão é bloqueado.

Os dosadores pneumáticos apresentam vantagens na precisão na dosagem de sementes e na prevenção de danos que podem ocorrer durante o processo de dosagem. Conforme observado por Mialhe (2012), esses dosadores demonstram maior eficiência no que diz respeito ao espaçamento entre as sementes.

FIGURA 11 - Dosador pneumático de semente com pressão negativa



Fonte: Mialhe (2012).

A combinação adequada entre o tubo condutor e o dosador pneumático reduz a média de espaçamentos das sementes, considerando a maneira como elas são liberadas diminui o contato com as paredes internas do tubo condutor, reduzindo, assim, o efeito de colisões, como apontado por (CARPES *et al.* 2017).

2.4.3 Acionamento dos elementos dosadores

Os meios de acionamento pelo qual transmitem a movimentação do sistema de dosagem de sementes podem ser classificados em 3 tipos principais: Acionamento mecânico roda terra, o acionamento elétrico e o acionamento hidráulico. A Figura 12 apresenta dois desses sistemas.

FIGURA 12 – Mecanismos de acionamento do sistema de dosagem: (a) acionamento roda terra e (b) acionamento elétrico



Fonte: PEREIRA (2023).

O meio de acionamento através do sistema roda terra, como visto na Figura 12 (a) funciona a partir da rotação de uma das rodas da semeadora, chamada de roda motriz, que transmite o movimento para um sistema de polias interligadas por correntes as quais fazem a movimentação do sistema de dosagem de sementes de forma integrada, ou seja, todas as linhas são dosadas com mesma taxa pois são interligadas pelo mesmo eixo da roda motriz.

Já a Figura 12 (b) representa um sistema de dosagem de semente com acionamento por meio de motores elétricos, cuja vantagem é a individualização de dosagem linha a linha, deixando todas as linhas da semeadora independente possibilitando o desligamento de seção. Além dos modos de acionamentos já mencionados, existe a solução intermediária implementada com o acionamento do dosador de forma hidráulica, em que um motor hidráulico efetua a movimentação do sistema de singulação da semente – trem de árvores de transmissão e engrenamentos movendo os dosadores – a partir do fluxo hidráulico desde as válvulas de controle remoto do trator.

2.5 MECANISMOS DE ENTREGA DE SEMENTE

Os mecanismos de entrega da semente abordam os procedimentos que ocorre após a singulação da semente, isto é, a condução e deposição da semente ao sulco de semeadura.

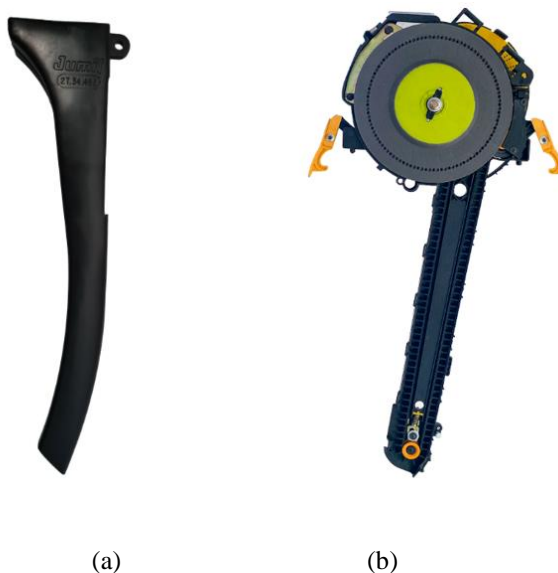
2.5.1 Condução de sementes ao sulco

O procedimento de entrega das sementes após serem singularizadas pelo mecanismo de dosagem é realizado pelo tubo condutor de sementes. Esse mecanismo faz com que as sementes caiam por ação gravitacional em seu interior e sejam conduzidas até o sulco de semeadura aberto como mostra a Figura 13 (a). Há também, a possibilidade de que a deposição de sementes seja forçada através de um mecanismo transportador no interior do tubo, conduzindo o grão da saída do dosador até as proximidades do fundo do sulco (MACHADO *et al.* 2005). Conforme ilustrado na Figura 13 (b).

O desenvolvimento de sistemas de condução ativa ou por meio de força gravitacional é impulsionado pela busca de soluções que abordam as fontes de incertezas relacionadas aos parâmetros de plantio. Os dosadores e os tubos condutores estão sujeitos, de uma forma ou de outra, às oscilações verticais dos carros de linha e às variações de inclinação do terreno.

O desempenho dos dispositivos condutores baseados na gravidade varia significativamente de acordo com a velocidade de deslocamento da semeadora pelo campo, como destacado por (CARPES *et al.* 2017).

FIGURA 13 – Exemplo de tubo condutor (a) por queda livre e tubo condutor (b) ativo de semente



Fonte: Jumil e Toplanting.

Considerando a necessidade de maior rendimento operacional, as fabricantes de semeadoras buscam desenvolver recursos para reduzir a variação das componentes cinemáticas e dinâmicas do deslocamento das sementes entre o conjunto dosador e o leito de semente.

2.5.2 Parâmetros pertinentes à singulação das sementes

A velocidade da operação de semeadura é um dos parâmetros que exerce grande influência no desempenho das semeadoras. Isso ocorre, porque a distribuição das sementes ao longo do sulco de plantio é afetada pela velocidade de deslocamento, a qual, por sua vez, tem impacto na produtividade da cultura (DELAFOSSÉ, 1986).

Há diversos trabalhos comprovando que a produtividade é diretamente afetada pela velocidade de semeadura, pois esse fator está associado à regularidade da distribuição longitudinal das sementes. Conforme Bertelli *et al.* (2016), demonstram o desempenho da plantabilidade de semeadoras pneumáticas considerando variações de velocidade de plantio, avaliando dois modelos de semeadoras John Deere (BT2117 e DB74).

No experimento de Bertelli *et al.* (2016), o ajuste de ambas as semeadoras foi configurado para uma distribuição média de 10,2 sementes m^{-1} , as passagens de plantio incluíram velocidades de ($V1 = 5,6 \text{ km h}^{-1}$, $V2 = 7,0 \text{ km h}^{-1}$, $V3 = 8,6 \text{ km h}^{-1}$ e $V4 = 10,0 \text{ km h}^{-1}$). Logo, para ambas as semeadoras, a proporção de espaçamentos considerados adequados diminuiu à medida que a velocidade de deslocamento aumentou. Além disso, os espaçamentos duplicados aumentam à medida que a velocidade aumenta, resultando em uma redução na uniformidade do plantio.

Isto ocorre, devido ao fato de que, conforme é aumentada a velocidade de deslocamento da semeadora, aumenta-se a velocidade de rotação do disco dosador diminuindo o tempo para que ocorra o preenchimento dos alvéolos do disco e também a capacidade de o dosador individualizar as sementes, aumentando o número de falhas e duplos, resultando em uma má distribuição espacial de plantas.

Segundo Portela (1997), dosadores mecânicos de precisão são equipados com discos alveolados que, ao girarem, capturam e armazenam as sementes até que uma abertura de saída permita a sua liberação. Por outro lado, os dosadores pneumáticos utilizam o ar para a captação das sementes e têm discos verticais com perfurações nas quais a sucção do ar mantém as sementes no lugar até que alcancem um ponto de liberação. Nesse ponto, a sucção é interrompida, resultando na liberação das sementes.

No período entre 1989 e 2000, houve a condução de uma análise comparativa da precisão na distribuição de sementes utilizando diversos mecanismos dosadores. Houve também a conclusão que, em velocidades de semeadura superiores a 7,5 km/h, a precisão na distribuição longitudinal de sementes é semelhante entre dosadores pneumáticos e aqueles com discos horizontais perfurados. Os erros na deposição podem ser atribuídos às variações que ocorrem na trajetória das sementes, desde a sua liberação pelo dosador até o contato com o solo. Isso ocorre devido ao rolamento ou colisões das sementes ao entrarem em contato com as paredes do tubo condutor e também ao rolamento após atingirem o solo no sulco de semeadura (REIS E ALONÇO, 2001).

Segundo Pacheco *et al.* (1996), as sementes adquirem maior velocidade de queda após liberadas do mecanismo dosador devido à variação da altura do dosador e à influência da força da gravidade, além da influência da componente horizontal de velocidade de avanço da semeadora. Este componente ocasiona um rolamento ou colisões fazendo com que as sementes saltem para fora do fundo do sulco de semeadura no momento do impacto com o solo.

2.5.3 Parâmetros pertinentes à condução das sementes

De acordo com Copetti (2003), os principais fatores que afetam a deposição de sementes são: a altura do mecanismo dosador (deve ser a menor possível); a forma de deposição (seja por gravidade ou por fluxo de ar); a velocidade da semente (variante da velocidade do dosador e velocidade de semeadura, quanto maior a velocidade, menor a precisão); configuração do tubo condutor (diâmetro, rugosidade interna, inclinação, angulação e altura em relação ao solo). A eficiência de qualquer sistema de distribuição de sementes será maior à medida que a distância entre o dosador de sementes e o sulco de semeadura diminuir.

Segundo Jasper *et al.* (2006), os tubos condutores com comprimentos maiores fornecem uma trajetória mais longa, ocasionando colisões pelo interior do tubo e afetando a distribuição de sementes. Dessa forma, tubos com perfil parabólico conduzem as sementes até o sulco de maneira mais suave, diminuindo este efeito, como exemplificado na Figura 14.

FIGURA 14 – Sementes em condições regular e sementes com colisões seguidas no tubo condutor



Fonte: Precision Planting.

Segundo Silva *et al.* (2000), o deslocamento do carro de linha da semeadora sob o solo pode ocasionar variações na trajetória das sementes quando sujeitas a vibrações dentro do tubo condutor. Isso em função das movimentações provocadas na semeadora, fazendo com que o tempo de queda das sementes seja alterado, e, conseqüentemente, gerando desuniformidade do espaçamento na linha de semeadura. Segundo o autor, as colisões das sementes no tubo condutor estão diretamente ligadas à velocidade de deslocamento da semeadora.

Conforme observado por Pacheco *et al.* (1996), o aumento na velocidade tangencial do disco dosador resulta em um ponto de impacto das sementes próximo à extremidade de entrada do tubo, o que gera um ângulo de impacto mais acentuado. Isso, por sua vez, pode ocasionar uma maior frequência de colisões das sementes dentro do tubo condutor.

De acordo com Carpes (2014), quanto mais acentuado for o ângulo de entrada das sementes no tubo condutor, maior será a falta de uniformidade na distribuição ao longo do comprimento do tubo, devido ao aumento dos ressaltos ocorrendo dentro do tubo condutor. Essa influência se torna ainda mais significativa quando a parte superior do tubo condutor se estreita. O autor também sugere que, para alcançar uma distribuição longitudinal mais eficaz, o ângulo de entrada inicial das sementes não deve exceder seis graus. Conforme observado, o tubo condutor, além de compensar ou neutralizar o componente de velocidade horizontal, deve ser projetado de maneira a minimizar os saltos ou reflexões das sementes dentro dele. Isso implica em uniformizar o período de permanência das sementes dentro do tubo, diminuindo a variabilidade no tempo de descarga entre sementes consecutivas.

2.6 PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO EVOLUÍDOS PARA CONDUZIR SEMENTES

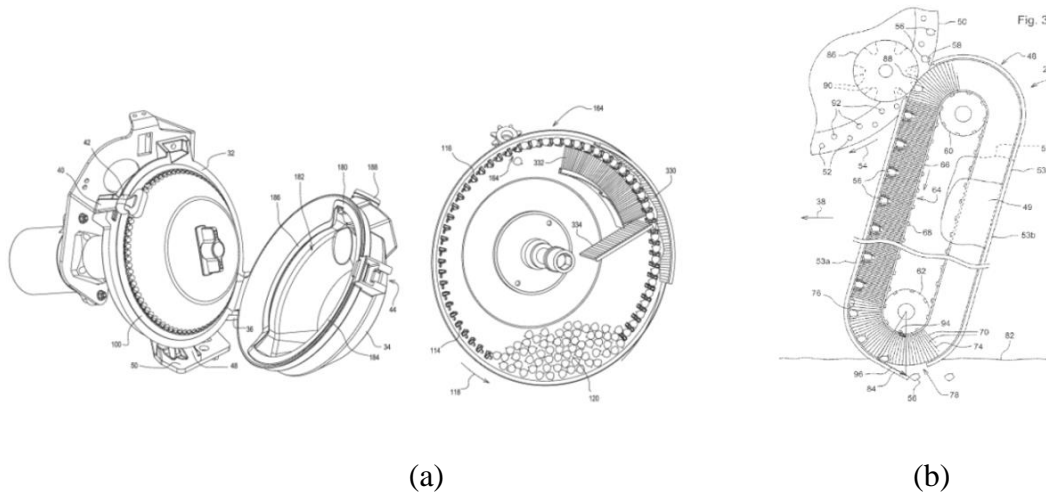
O ato de guiar ativamente as sementes, desde o ponto de dosagem até a colocação individual em seu leito de semeadura, representa uma inovação notável no cenário das semeadoras de alta precisão. A introdução desse tipo de solução surge da motivação de solucionar os fatores geradores de incerteza associados aos parâmetros de plantio encontrados nas abordagens que dependem do uso da gravidade. Os dispositivos dosadores, de uma forma ou de outra, estão sujeitos a movimentos verticais ocasionados pelos desníveis do terreno e às variações na inclinação do solo. A eficácia dos métodos de condução por gravidade apresenta variações consideráveis conforme a velocidade de deslocamento da semeadora pelo campo (CARPES, *et al.* 2017).

As tecnologias mais recentes de dosadores utilizam pressurização de ar para manter as sementes em movimento sobre as cavidades do disco dosador. Essa forma de pressurização pode ser configurada em pressão negativa, na qual o vácuo succiona as sementes contra os alvéolos/cavidades do disco dosador, ou na forma de pressão positiva, onde o fluxo de ar mantém as sementes pressionadas contra a cavidade do disco dosador.

A identificação dos conceitos de dosadores e condutores existentes no mercado do Agronegócio, é realizada através da pesquisa de propriedades relativas aos subsistemas de dosagem/singulação de sementes e sua entrega ao sulco de plantio sobre o solo. Complementa este levantamento, a análise documental de patentes por meio da plataforma “*Orbit Intelligence, Patentscope, e Google Patents*”, para avaliar o estudo do estado da arte sobre as tecnologias de distribuição e entrega de sementes no sulco de semeadura.

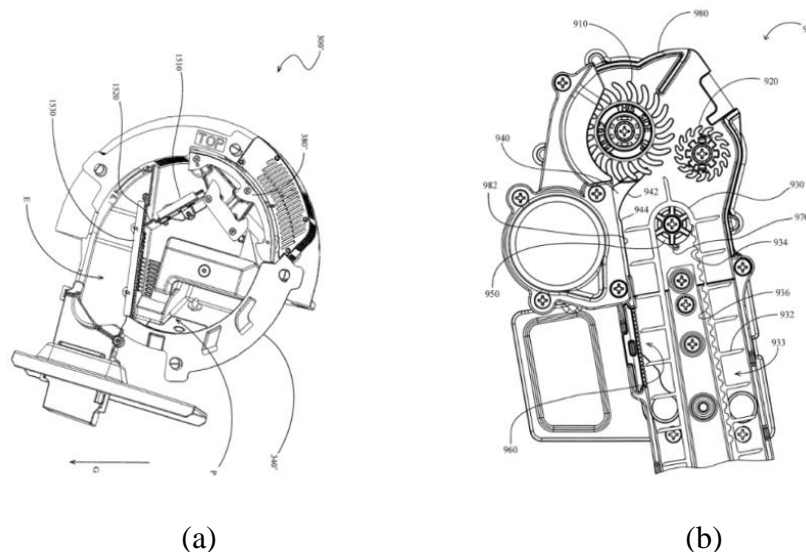
2.6.1 Condução por elementos mecânicos

O sistema *ExactEmerge* da empresa John Deere, ilustrado na Figura 15 (a) representa a concepção do mecanismo de dosagem elétrico de sementes. Este mecanismo utiliza um diferencial de pressão de ar, ou seja, vácuo, para aderir a semente sobre um elemento de dosagem. O agrupamento de sementes é posicionado em um lado do disco côncavo, em uma porção inferior do mesmo, enquanto o vácuo é aplicado no lado oposto do disco. A condução da semente até o sulco aberto é realizada pelo conjunto de mecanismos e elementos condutores de sementes através de escovas, como mostra Figura 15 (b).

FIGURA 15 - Sistema *ExactEmerge*, John Deere

Fonte: (GARNER *et al.* 2011; THIEMKE *et al.* 2010).

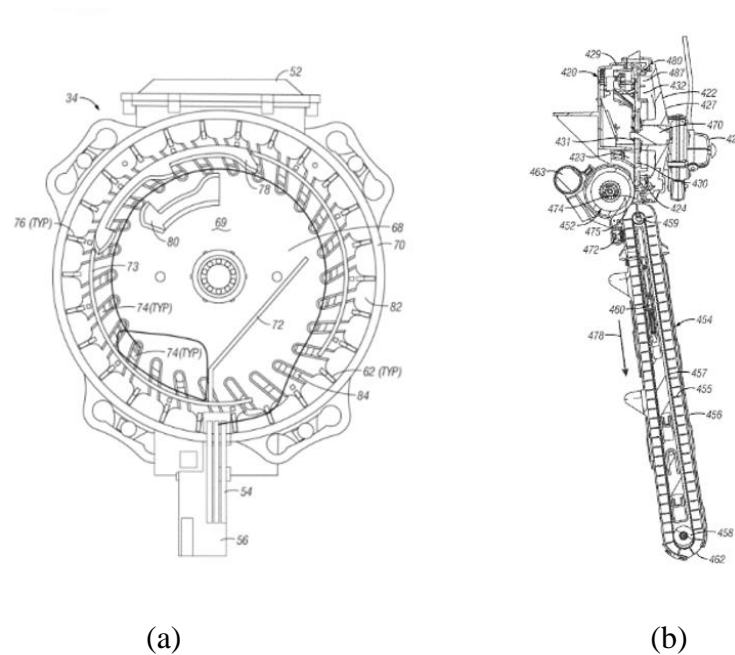
O modelo de dosador *vSet* e tubo condutor *Speed Tube* elétrico é desenvolvido pela empresa *Precision Planting*. Este sistema de dosagem Figura 16 (a) opera a vácuo e busca melhorar a singulação através de um singulador flutuante que mantém contato com o disco de sementes. Além disso, o dosador é compatível com diferentes tubos condutores, possibilitando que a semente seja deslocada até o sulco por gravidade ou por controle de velocidade da semente que é o caso do “*Speed Tube*” como mostra a Figura 16 (b), que oferece uma tecnologia de transporte da semente por esteira flexível.

FIGURA 16 - Sistema *vSet* e *Speed Tube* (*Precision Planting*)

Fonte: (TIM; RADTKE 2017; RADTKE; SWANSON 2018).

Outra solução de dosagem e entrega de sementes é produzida pela *Kinze Manufacturing* nos EUA com o nome *True Speed*. Este modelo consta de um dosador elétrico como mostra a Figura 17 (a), posicionado transversalmente em relação ao sentido de percurso da semeadora que utiliza vácuo para manter as sementes alocadas sobre o disco do dosador, raspadores para individualizar as sementes e um diferencial que é a forma de transporte da semente do disco dosador até o tubo condutor, fator que afeta na singularização da entrega da semente. Este sistema de transporte é realizado através de uma escova cuja entrega do dosador possui velocidade controlada, enquanto o transporte da semente sobre o tubo condutor ocorre através de um sistema de esteira flexível que faz a entrega da semente sobre o sulco de semeadura aberta como apresenta a Figura 17 (b).

FIGURA 17 - Sistema *True Speed* (*Kinze Manufacturing*)

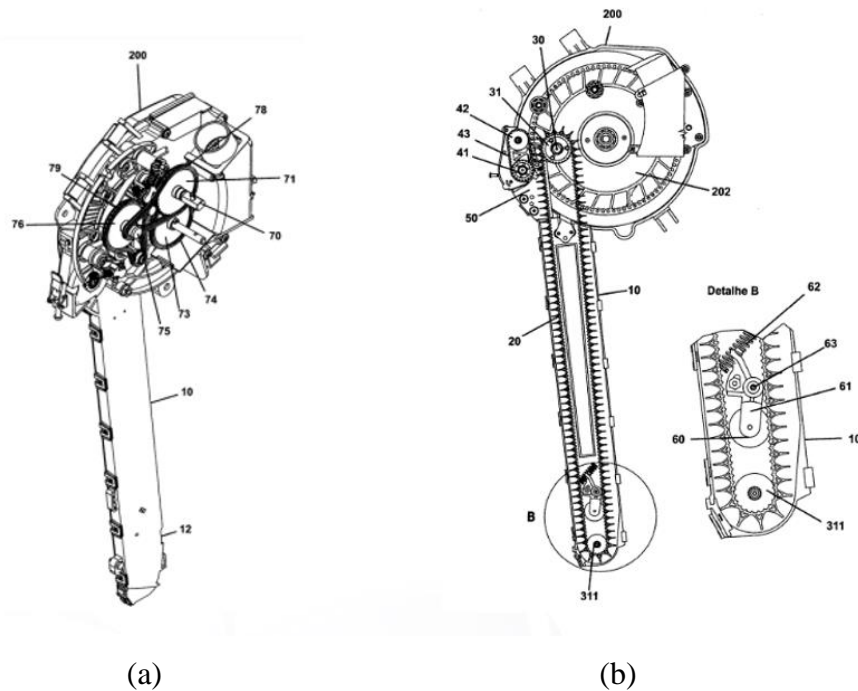


Fonte: (WILHELMI *et al.* 2018).

A empresa *TOPlanting* é desenvolvedora de um sistema dosador à vácuo e condutor conhecido no mercado brasileiro como *VControl*. Este sistema apresenta um sistema dosador a vácuo dotado de uma transmissão por correntes que permite a movimentação de todo o sistema de dosagem como mostra a Figura 18 (a). Além disso, o sistema consta de uma placa guia que direciona as sementes até o duto condutor que é composto por correia talisca³ cuja denominação é dada pela empresa. A Figura 18 (b) ilustra o mecanismo de condução.

³ Correia talisca: correia com suporte transversal, cuja a função é sustentar o grão transportado durante a trajetória de condução até o sulco de semeadura.

FIGURA 18 - Sistema VControl (TOPlanting)



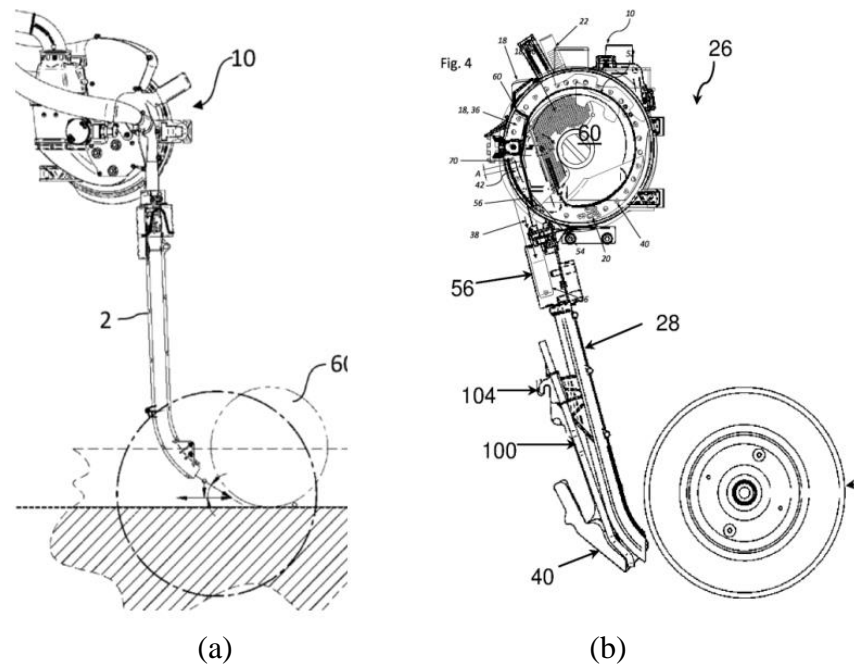
Fonte: (SILVA; NOER, 2019).

2.6.2 Condução ativa pneumática

Além dos condutores baseados em elevadores, empresas como a *Horsch* e a *Maschio Gaspardo* utilizam o efeito do ar soprado para impulsionar a semente internamente ao duto condutor, até que esta chegue ao leito de semeadura onde é atraída pela roda afirmadora solidária ao carro de linha. No sistema da *Maschio Gaspardo*, o sopro se dá intermediário ao condutor de descida (DONADON; BOT; MIOLO, 2017). Os sistemas de dosagem e condução de sementes Horsch usam princípios vinculados à pressão de ar sobre cavidades de fluxos, sob efeito de pressão negativa (Vácuo, *AirVac*) ou efeito de pressão positiva (Sopro, *AirSpeed*).

Para as soluções mostradas na Figura 19, o recurso *AirVac* trabalha com dosador a vácuo e condução da semente sob gravidade até o sulco, onde será afirmada por roda apanhadora com rodado pneumático (PIRKENSEER, 2019); a solução *AirSpeed* trabalha com derivações do fluxo de ar a partir dos sistemas de bombeamento e dosagem de sementes baseados em sopro, que irá impulsionar a semente em trajetória de tangência sob a roda apanhadora, assim afirmando a semente sobre o sulco (ERHARD, 2021). A Figura 19 (a) apresenta o sistema de dosador enquanto a Figura 19 (b) ilustra o mecanismo de condução por fluxo de ar.

FIGURA 19 - Sistema AirVac e AirSpeed (Horsch)



Fonte: (ERHARD, 2021; PIRKENSEER, 2019).

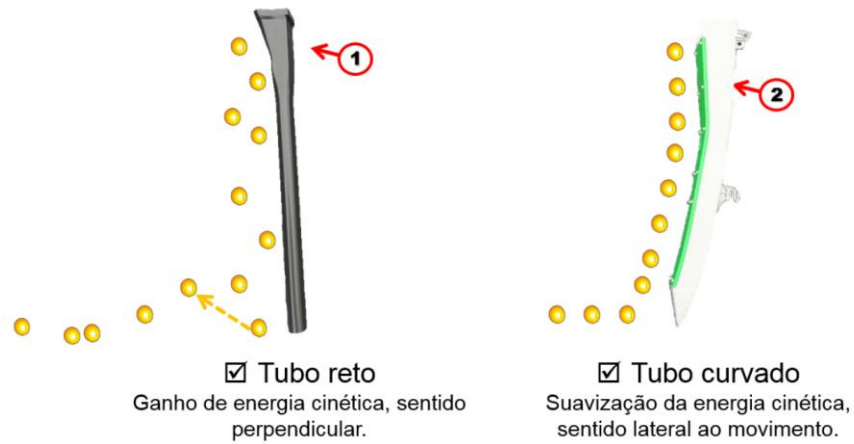
As soluções de dispositivos de dosagem e condução disponíveis no mercado são definidas de acordo com os princípios de resolução adotados, que se originam a partir de direitos de propriedade intelectual de empresas que integram o setor de semeadoras. Nesse contexto, as tecnologias são apresentadas no estado atual da técnica, levando em consideração o seu estado de comercialização ou testes.

2.6.3 Análise de tecnologias de condução de sementes por gravidade

O tubo condutor de sementes tem a função de suavizar o impacto da semente ao solo. Isso é, além de atuar como condutor, o mesmo tende a diminuir a velocidade da semente para próximo de zero, para ocorrer o contato suave com o solo. Uma grande dificuldade é a condução precisa da semente por dentro do tubo, devido a interferência direta sofrida pelas possíveis vibrações do carro de linha da semeadora.

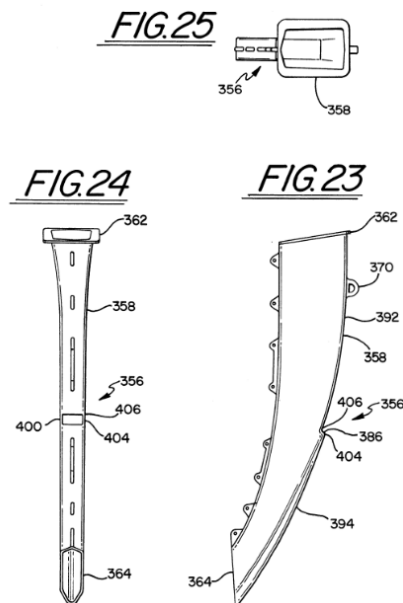
A ilustração da Figura 20 exemplifica a diferença da geometria do tubo condutor reto e curvado.

FIGURA 20 - Diferença entre tubo condutor reto e curvado



Fonte: Rodrigues (2022).

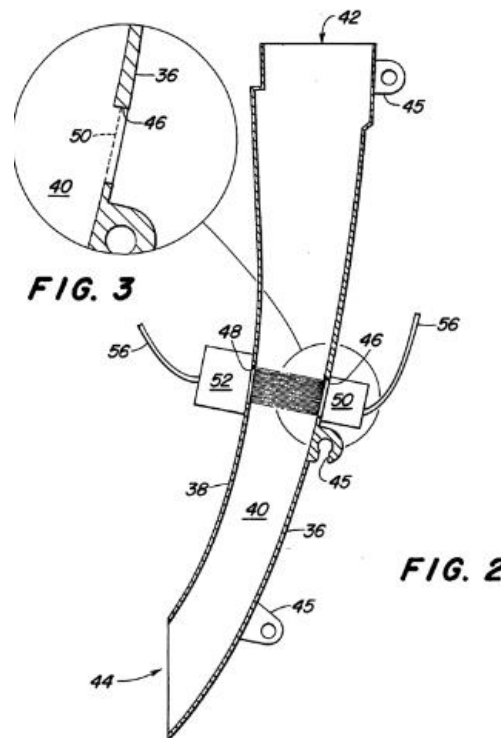
Os sistemas de tubos condutores por efeitos da gravidade são os mais utilizados em semeadoras de precisão, pois é uma tecnologia mais viável economicamente quando comparados com a condução ativa. A solução mostrada na Figura 21, representa um componente de condução desenvolvido pela empresa *Case Corporation*, cujo tubo de semente define o caminho percorrido curvo e estreito com paredes internas lisas e com monitoramento por meio de sensores.

FIGURA 21 - Tubo condutor de semente *Case Corporation*

Fonte: (JOHN F. Stufflebeanm *et al.* 2001).

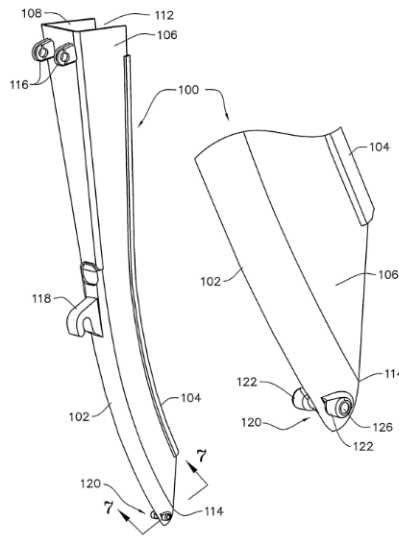
A empresa John Deere possui a propriedade de uma tecnologia de tubo condutor de sementes para semeadoras, de forma que são periodicamente dosadas pelo dosador e liberadas para depósito no solo através da condução por meio do condutor em que a semente se desloca em queda livre. O sistema constitui de um topo aberto para receber a semente e um fundo aberto para depositar a semente, na parede frontal é aplicado o sensor de detecção para identificar o fluxo de sementes que passa pelo tubo, como mostra a Figura 22.

FIGURA 22 - Tubo condutor de semente (John Deere)



Fonte: (BERGLAND N. Robert *et al.* 1999).

A solução de condução de sementes por gravidade apresentada na Figura 23, é desenvolvida pela empresa *Precision Planting* aplicados a semeadoras de precisão. A concepção apresenta geometrias similares às já declaradas, porém, ressalta a importância da curvatura na extremidade da saída inferior ser constituída de material mais resistente para evitar desgaste e resistência no contato entre a semente e o tubo.

FIGURA 23 - Tubo condutor de semente (*Precision Planting*)

Fonte: (SAUDER, Derek, A; PLATTNER, Chad, E; WIEGAND, Brand, A. 2007).

Portanto, o conjunto de soluções aplicáveis não se limita apenas às soluções já existentes, ao mesmo tempo, essas as soluções descrevem os componentes presentes no mercado do Agronegócio com objetivo eficiente na distribuição e condução de sementes no sulco. Esses componentes precisam ser claramente definidos com suas funções principais na etapa do projeto, de modo a direcionar a aplicação com base em princípios que permitam a implementação dessas funções de forma separada e distinta no desenvolvimento de projetos.

2.6.4 Análise crítica pertinente aos princípios de soluções

Como se trata de um estudo baseado em pesquisas, isso nos gera questionamento perante a exatidão da funcionalidade destes mecanismos de dosagem/singulação e transporte de sementes. Nesse contexto, percebe-se que há várias tecnologias de dosadores de sementes em domínio de empresas distintas no mercado de máquinas agrícolas, porém apesar das suas distinções de projetos, todos eles buscam o mesmo objetivo, a dosagem correta da semente. Uma consideração verificada sobre os princípios de soluções dos dosadores é que a maioria dos casos se preocupa com a individualização correta, para evitar duplas e falhas nos alvéolos do disco, mas deixa de se preocupar com a passagem entre a liberação da semente e a entrada no tubo condutor. Essa identificação se dá pelo fato de que enquanto a semente é totalmente conduzida presa sob o disco ela possui velocidades e direções controladas, mas no instante de liberação pode tornar-se um fator causador de erros na precisão.

Referente aos meios de condução da semente após serem dosadas, verificou-se tecnologias de condução ativa e condução por força gravitacional. Ambas possuem um objetivo final, a condução da semente ao sulco de semeadura. Portanto, cada empresa apresenta um domínio perante aos elementos e materiais utilizados para que este objetivo seja atingido. Enquanto as sementes caem em queda livre, elas assumem graus de liberdades distintos a cada colisão com o interior do tubo, fazendo com que a semente chegue ao sulco com velocidades maiores quando comparadas com os condutores ativos. Isso ocorre, pelo fato de que as sementes quando conduzidas ativamente, apresentam velocidade e deslocamentos encapsulados na região onde o mecanismo direciona, enquanto em queda livre a semente assume variações que podem ser provenientes de fatores externos.

2.7 TEORIA DA DINÂMICA DE PARTÍCULAS

Determinar em um dado instante, o comportamento dinâmico de partículas ou um sistema de partículas que interagem puramente por forças de contato é essencial para rastrear individualmente e prescrever como ocorre as interações entre partículas e sistemas mecânicos onde relaciona forças mecânicas envolvidas, como posição, deslocamento e velocidade.

2.7.1 Movimento retilíneo uniformemente variado

Galileu Galilei escreveu sua primeira obra “De Motu Antiquiora” sobre o movimento entre os anos de 1589 e 1592, porém não foi publicada até 1687, após sua morte. Esta obra nunca foi publicada durante sua vida, devido a algumas incertezas em sua matemática e certas evidências sobre suas compreensões. Galileu, demonstrou teoricamente a lei do movimento retilíneo uniforme, o qual corpos percorrem sempre a mesma distância em um mesmo intervalo de tempo. Além disso, definiu a lei do movimento retilíneo uniformemente variado, segundo a qual a velocidade de queda de um corpo cresce uniformemente com o tempo. A grande diferença é que no movimento retilíneo uniformemente variado a aceleração é diferente de zero e a velocidade não é mais constante.

O movimento retilíneo uniformemente variado, define o segmento da trajetória retilínea e apresenta uma alteração uniforme no módulo de velocidade de corpos em movimento. É um movimento com aceleração diferente de zero e constante, dessa forma, a velocidade do corpo aumenta ou diminui uniformemente ao longo do percurso.

A física tem como objetivo compreender o comportamento dos corpos no espaço, e a cinemática é a área que se concentra em estudar o movimento desses objetos. Por exemplo, ao explorar o movimento retilíneo uniformemente variado, é possível adquirir compreensão sobre como os veículos podem acelerar ou desacelerar, bem como os objetos caem em queda livre, abrangendo diversas situações do cotidiano.

A Equação de Torricelli utilizada para desenvolvimento deste estudo dinâmico, foi proposta pelo discípulo de Galileu Galilei, físico e matemático italiano Evangelista Torricelli. A primeira definição foi proposta através do movimento da água, de modo que buscava calcular a velocidade de saída de um jato de água jorrando de um pequeno orifício em um recipiente. Com isso, Torricelli observou que o fluxo era equivalente à velocidade de uma gota em queda livre. De modo geral, as equações do MRU e MRUV são apresentadas no Quadro 3:

QUADRO 3: Equações do MRU e MRUV utilizadas para modelagem analítica da semente em queda

Velocidade média	$V_m = \frac{dx}{dt}$	(2.3)
Velocidade Instantânea	$\dot{x} = \dot{x}_o + \ddot{x} \cdot t$	(2.4)
Velocidade de Torricelli	$\dot{x}^2 = \dot{x}_o^2 + 2 \cdot \ddot{x} \cdot \Delta x$	(2.5)
Função horária do espaço no MRU	$x = x_o + \dot{x} \cdot t$	(2.6)
Função horária do espaço no MRUV	$x = x_o + \dot{x} \cdot t + \frac{\ddot{x} \cdot t^2}{2}$	(2.7)
Aceleração	$\ddot{x} = \frac{dv}{dt}$	(2.8)

Fonte: Elaborado pelo autor.

As equações de MRU e MRUV são utilizadas para dimensionamento dinâmico do deslocamento e queda livre da semente.

3 METODOLOGIA

Segundo Lakatos (2021), a pesquisa investigativa busca captar a essência do real, através da compreensão da forma e das leis da natureza. Este modelo de pesquisa trata de uma investigação de um conjunto de ações simultâneas, que tem por interesse descobrir, analisar, descrever e modelar fenômenos observados na dosagem e entrega de sementes de soja em semeadoras precisas.

3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Quanto a metodologia para alcançar os resultados, foram empregados dois prosseguimentos:

- Pesquisa exploratória: para aumentar o nível de informação a respeito do entendimento sobre os sistemas de dosagem/singulação e entrega de sementes em semeadoras de precisão presentes no mercado atual, além dos fatores que influenciam na homogeneidade da semeadura.
- Pesquisa descritiva: a partir do conhecimento obtido na fase de pesquisa exploratória, procedeu-se à síntese do modelo diagramático que descreve as funcionalidades necessárias à entrega da semente.
- Pesquisa experimental: a partir do conhecimento agregado, realizou-se a implantação do modelo analítico experimental para efetuar a análise determinística da trajetória da semente, desde o processo de dosagem até a entrega ao sulco.

Resumidamente, a abordagem de pesquisa explora o conteúdo, descreve suas funcionalidades, investiga o modo de funcionamento dos sistemas e aborda as relações entre eles. A abordagem em relação às técnicas utilizadas na condução da pesquisa é delineada com base nos seguintes tipos:

- Pesquisa bibliográfica: a pesquisa bibliográfica inclui a busca de conhecimento, sob a forma de conteúdo elaborado e publicamente declarado, em formato de livros, artigos, e títulos de patentes.
- Pesquisa descritiva: a pesquisa descritiva envolve a interpretação do conhecimento levantado na etapa anterior para a caracterização da funcionalidade de entrega da semente por semeadora precisa.

- Pesquisa Experimental: abrange a aplicação da metodologia de análise dinâmica determinística da semente, para verificar o comportamento da semente no processo de semeadura.

Cada uma dessas fases é descrita a seguir com base nos métodos empregados para sua execução. Os métodos descrevem a sistematização pelo qual as informações foram obtidas, analisadas e agregadas para construção do conhecimento.

3.1.1 Pesquisa Exploratória

As atividades relacionadas a essa pesquisa investigativa, foram executadas com a utilização de recursos e equipamentos de informática próprios. Estes recursos, constituíram elementos importantes para a busca de documentos e publicações em meio eletrônico. Estas publicações foram baixadas a partir da conexão à internet vinculadas ao acervo eletrônico da instituição de ensino Universidade Federal de Santa Maria e os recursos de acesso serão apresentados a seguir:

Base de Periódicos: a base de periódicos disponibilizada pelo CAPES em convênio com a Universidade Federal de Santa Maria, por meio do Portal Institucional, possibilitou a busca de conteúdo e informações relativas ao tema da pesquisa, incluída em publicações científicas nacionais e internacionais.

Bases de Pesquisa Científica: a base de pesquisa como *Google Acadêmico* e *ScienceDirect* possibilitou o acesso de publicações científicas disponíveis em domínio público a partir do acervo pessoal de aluno de pesquisa. Entre essas publicações foi possível encontrar artigos em revistas científicas e congressos.

Base de Pesquisa de Anterioridade: a base de pesquisa de anterioridade como *Patentscope*, *Orbit* e *Google Patents* favoreceu a busca por títulos de patentes de princípios de solução utilizados em produtos consolidados no mercado atual de semeadoras, para melhorar o entendimento em respeito de dosadores e tubos condutores de sementes em semeadoras precisas.

3.1.2 Pesquisa Descritiva

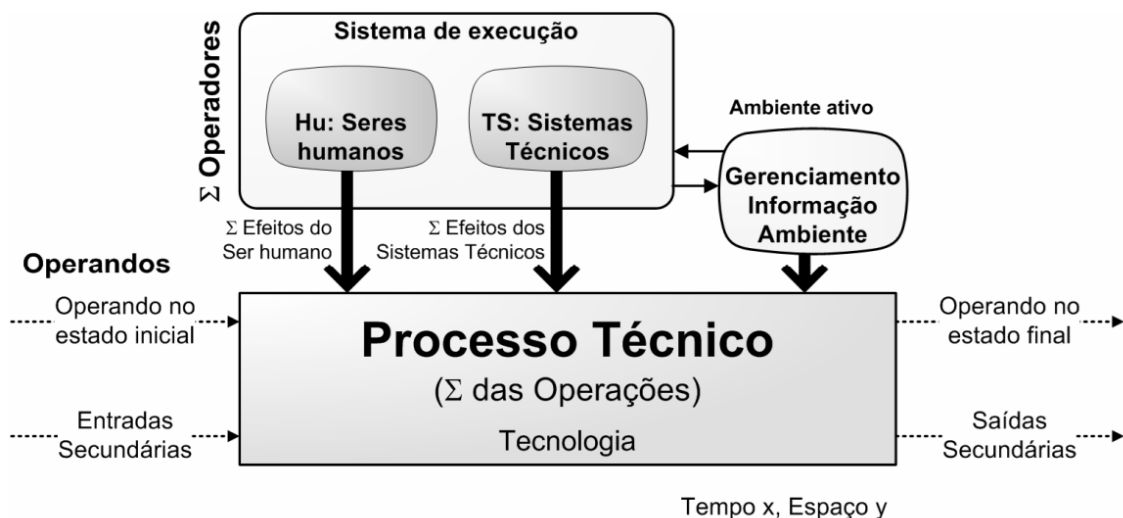
A pesquisa descritiva aborda a definição da sistemática da modelagem dinâmica da semente no ato da semeadura, com utilização de semeadoras precisas com sistemas dosadores de disco vertical pneumático.

A abordagem descritiva teve como primeira etapa a síntese do modelo diagramático de estrutura funcional (Back, 1983; Pahl *et al.*, 2005; Marini, 2007; Back *et al.*, 2008), para suportar o desenvolvimento da modelagem determinística da trajetória da semente ao longo de dutos condutores em semeadoras de precisão.

O conhecimento de dosadores e condutores no âmbito de semeadura precisas está associado a vários fatores de influência, além de uma sistematização de processos estabelecidos de forma a desenvolver a semeadura seguindo os fundamentos dos sistemas desenvolvidos. Neste âmbito, um grande motivador para este desenvolvimento dinâmico foi a utilização da metodologia diagramática da estrutura funcional de processos técnicos de Hubka & Eder (1992 *apud* MARINI, 2007) como mostra a Figura 24, dos dosadores e condutores concebidos no estudo (Alberti & Marini, 2023).

Os processos técnicos podem ser decompostos em sequencias de operações, a partir das quais se obtém efeitos que, quando combinados, colaboram para a eficácia da transformação. Esses efeitos devem ser incorporados ao processo, de forma planejada, em locais e de maneiras específicas.

FIGURA 24 - Modelo Geral de Processos Técnicos



Fonte: Hubka & Eder (1992) traduzido por Marini (2007).

De modo geral, o processo técnico pode ser interpretado como o desdobramento de operações em conjunto que transformam elementos de uma fase inicial para uma fase final útil. O método de realização de um processo técnico é responsável por efetuar ações de intervenções, seja ela mecânica, demanda de energia, ou sinal.

A interpretação das funções desenvolvidas pelos processos técnicos foi definida tendo como base o grau de entendimento dos fatores de influência em respeito aos sistemas dosadores e tubos condutores de sementes aplicados em semeadoras de precisão. Conhecendo essas informações, preenche-se as lacunas relativas as definições de características práticas do sistema e o estabelecimento das funções parciais como fluxo principal. A partir dessa interpretação, é possível detectar meios de realizar as funções definidas para a operação em análise.

3.1.3 Pesquisa Experimental

A execução do trabalho de pesquisa é delineada por critérios de identificação dos fatores dinâmicos de partículas, para análise de movimento de sementes graúdas, em específica soja. O objetivo é determinar o comportamento dinâmico da semente desde o processo de singulação pelo dosador pneumático de disco vertical, até o percurso de queda livre após a semente ser dosada.

A estratégia para desenvolvimento do equacionamento dinâmico abrange os seguintes elementos funcionais das semeadoras:

- Configuração e análise do dosador considerado para este estudo em específico.
- Particularidades do sistema de vácuo do sistema dosador.
- Características dimensionais do disco do dosador.
- Características dimensionais do tubo condutor de semente.

Além disso, fatores que envolvem homogeneidade de semeadura são considerados, como:

- Definição da população de plantas por área e as características físicas.
- Colisões e coeficiente de restituição da semente de soja.
- Variação da velocidade de Semeadura.

Estas considerações são apresentadas em formas de tópicos para melhor apresentar o método dinâmico elaborado.

3.1.4 Considerações necessárias para elaboração do equacionamento dinâmico

O presente estudo trata de uma análise investigativa sobre os meios de funcionamento de semeadoras precisas e a forma de dosagem/singulação e entrega de semente ao sulco, a elaboração dinâmica parte de algumas considerações que podem ser variantes de caso para caso, considerando diferentes sistemas de dosagem e entrega de semente aplicados a semeadoras precisas.

A seguir, estão as considerações necessárias neste contexto elaborado:

- I. O grão de soja é considerado perfeitamente esférico.
- II. A massa do grão de soja é igualmente distribuída em todo o seu volume.
- III. O grão de soja é perfeitamente vinculado ao alvéolo do dosador enquanto se encontra na cavidade do disco dosador.
- IV. O grão de soja descreve o movimento bidimensional de queda livre, este modelado de maneira conservativa, simulando queda de uma única semente por vez.
- V. Interações do grão com elementos da semeadora são entendidas em função de quantidade de movimento.
- VI. O referencial para desenvolvimento analítico dinâmico é considerado o próprio carro de linha com componentes totalmente fixados.
- VII. Despreza-se também vibrações e deslocamentos externos quaisquer, tais como as vibrações do carro de linha.

O equacionamento dinâmico foi elaborado em cinco fases. Na primeira fase, foi definido a utilização do modelo de sistema dosador e foram analisadas suas características físicas e funcionais. A segunda fase, refere-se à identificação do tubo condutor de semente, para fixar a queda livre da semente, de acordo com modelo de tubo existente no mercado de semeadoras precisas. A terceira fase, foca nas características físicas que abrangem as sementes utilizadas no plantio tratando das variações de populações por área semeada, no que abrange número de plantas por metro linear e espaçamentos entre plantas. A quarta fase, explora o fato das colisões que a semente sofre na trajetória pelo interior do tubo condutor. E por fim, quinta e última fase, investiga velocidades de semeaduras utilizadas para cultura da soja.

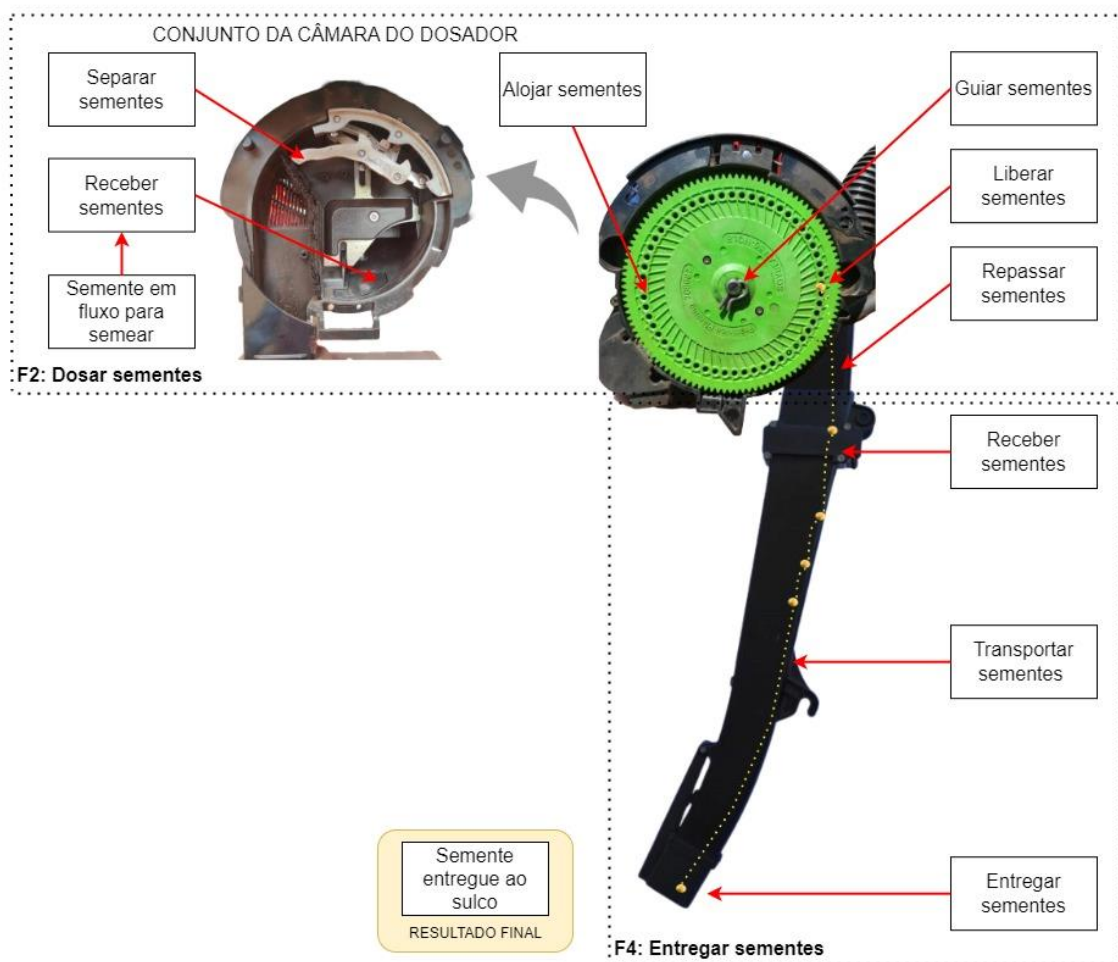
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção estão apresentados os resultados do desenvolvimento completo do estudo exploratório, explícitos separadamente em três tópicos: estrutura funcional do conjunto de dosador e tubo condutor, equacionamento analítico da trajetória da semente e resultados da análise dinâmica.

4.1 ESTRUTURA DE FUNCIONAL DAS SUBFUNÇÕES DE DOSAGEM E CONDUÇÃO DE SEMENTES

A estrutura de funções parciais para semeadura desenvolvida por Alberti & Marini (2023), mostra as funções elementares organizadas em duas funções parciais: “F2 Dosar sementes” e “F4 Entregar sementes”. Conforme a Figura 25.

FIGURA 25 - Fluxo principal de funções do dosador e tubo condutor de semente

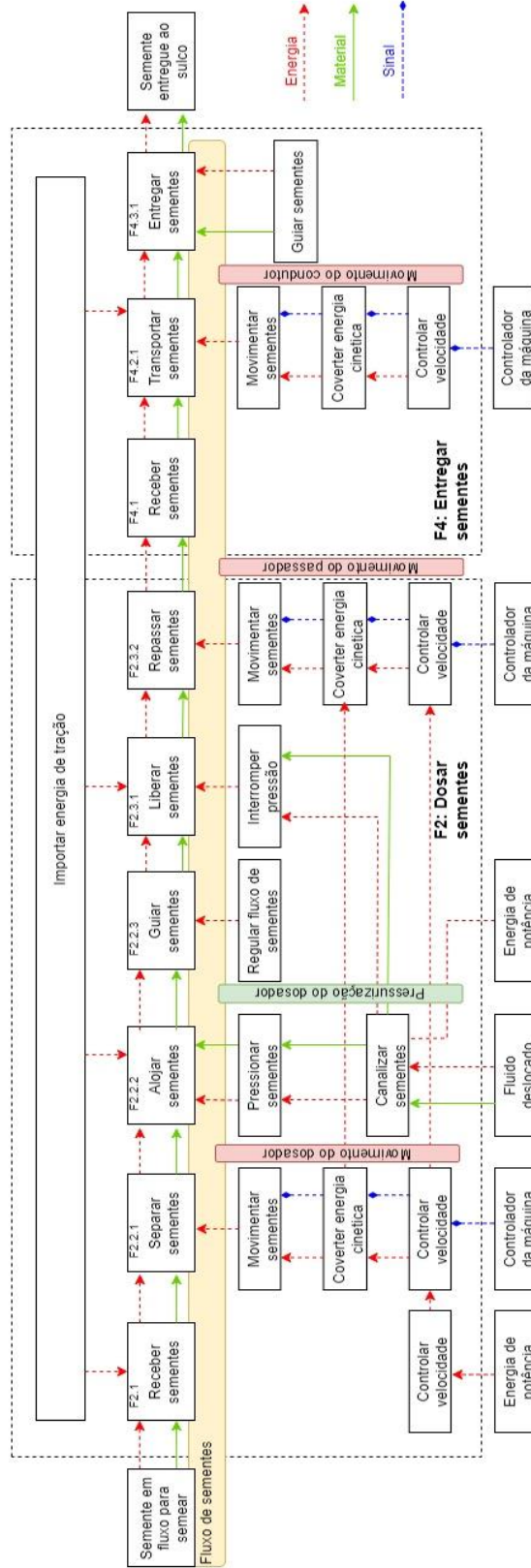


Fonte: Elaborado pelo autor.

As funções são derivadas da análise dos sistemas dosadores e tubos condutores presentes no mercado de máquinas agrícolas, explorando a metodologia de desenvolvimento de Reis & Forcellini (2002), a fim de determinar a estrutura funcional das subfunções de dosagem e condução de sementes como mostra a Figura 26.

A decomposição das ações sofridas pela semente e dos princípios de trabalho auxiliares resultou em diferentes ações pertinentes aos seguintes processamentos: o fluxo principal de sementes (dourado) através do dosador e elemento condutor (ativo), o fluxo de ar (verde) pressurizando a cavidade do dosador, e os fornecimentos de energia mecânica (vermelho) para o fluxo de dosagem de sementes através do dosador e do elemento condutor. Assim sendo, a análise das soluções de dosadores e transportadores de sementes disponíveis no mercado resulta no entendimento da cadeia de ações necessárias para efetuar a condução controlada da descida da semente, incluindo a dosagem das sementes, a passagem delas entre o dosador e o elemento condutor, bem como o transporte da semente pelo elemento condutor até o sulco de plantio.

FIGURA 26 - Estrutura funcional das subseções de dosagem e condução de sementes



Fonte: Alberti & Marini (2023).

4.2 MODELAGEM DETERMINÍSTICA DA DINÂMICA DA SEMENTE

Este tópico apresenta os resultados da elaboração da modelagem dinâmica da semente, realizadas pelas equações frutos das leis da física que exploram os efeitos da dinâmica de partículas. Como o movimento é bidimensional, são desprezadas quaisquer componentes dinâmicas atuando no eixo “z”.

4.2.1 Caracterização analítica do dosador de sementes

O sistema de dosagem abordado na aplicação deste estudo de modelagem dinâmica foi um dosador pneumático, de modelo vSet de propriedade da empresa Precision Planting, utilizados em distintos segmentos de semeadoras brasileiras, como é o caso da semeadora Extra da empresa Kuhn Brasil como mostra a Figura 27.

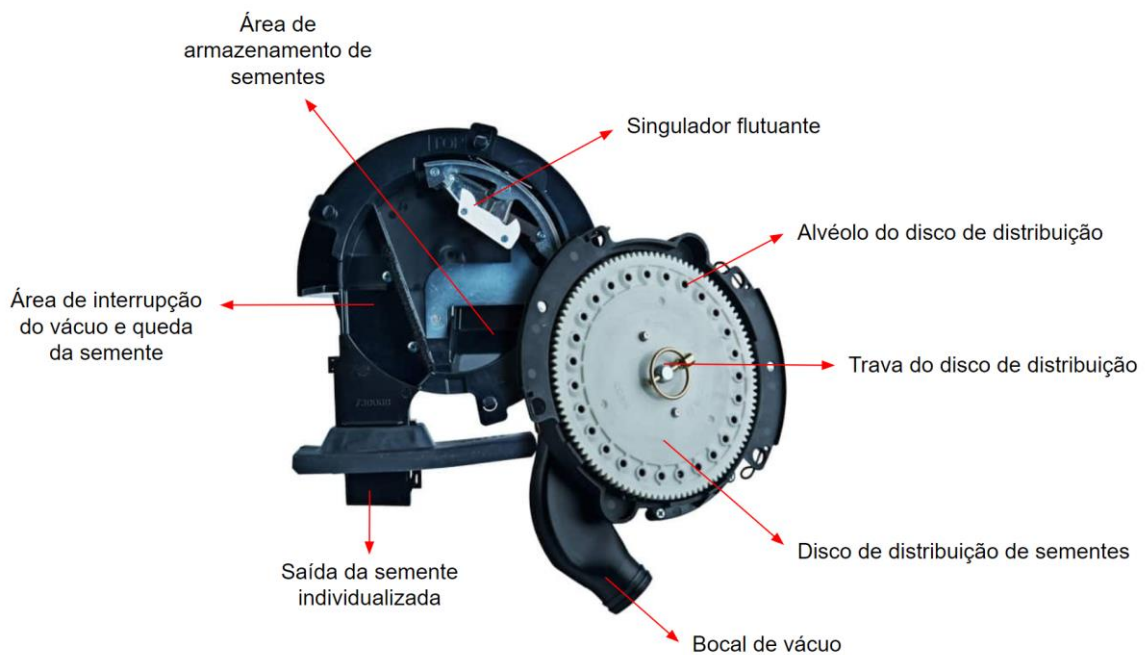
FIGURA 27 - Semeadora Kuhn Extra



Fonte: Arquivo do autor.

O mecanismo dosador vSet é apresentado na Figura 28, juntamente com seus componentes funcionais que possibilitam um bom funcionamento do sistema. O dosador é dividido em duas partes: na região mais à esquerda da Figura 28, encontra-se a caixa principal onde é separada em áreas, por exemplo, a região de armazenamento de sementes, cuja cavidade apresenta um singulador flutuante que tem função de evitar que mais de uma semente seja succionada em cada alvéolo, além de apresentar a região de interrupção do vácuo, cujo objetivo é ejetar a semente individualizada para que ela seja liberada em queda para o tubo condutor; Na região à direita da Figura 28, encontra-se o disco de distribuição de sementes com seus alvéolos, que podem variar para cada cultura, apresenta também a trava do disco de distribuição e o bocal de vácuo cuja função é canalizá-lo para as regiões de sucção.

FIGURA 28 - Sistema de dosagem vSet Precision Planting



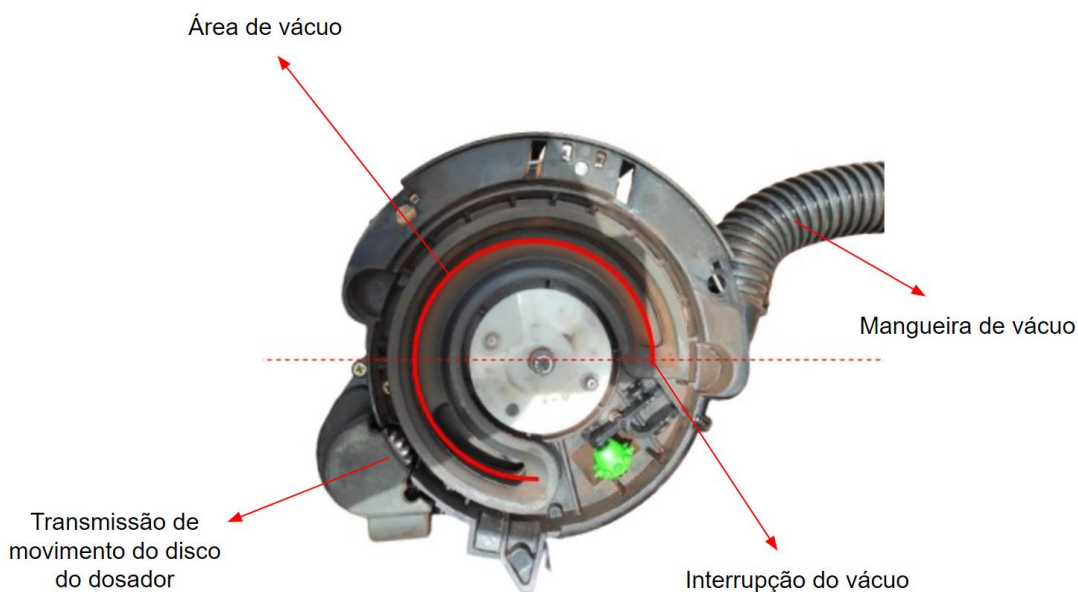
Fonte: Freitas Máquinas (2023).

Este sistema de dosagem, apresenta o disco de distribuição plano e com uma única configuração de vácuo, tornando capaz de prender a semente nos alvéolos do disco sem que isso cause danos físicos ao produto. Além disso, o singulador flutuante possui cinco pontas que garante que nenhum tipo de dupla ocupe o mesmo furo no disco de distribuição, ou seja, uma semente é succionada no furo e outra é extraída pelo singulador.

4.2.2 Particularidade da área com presença de vácuo

O dosador sob análise, possui uma peculiaridade que é a efetuação da dosagem e singulação das sementes por meio de uma região com presença de vácuo, cujo objetivo é a sucção da semente sob os alvéolos do disco do dosador. Da mesma forma, possui uma região com interrupção do vácuo, com a finalidade de liberar a semente presa no disco por meio da força gravitacional. A Figura 29 mostra essas regiões.

FIGURA 29 - Regiões de vácuo no dosador



Fonte: Arquivo do autor.

Verifica-se que há uma área de vácuo de aproximadamente 270° em relação a linha horizontal tracejada, isso faz com que o ponto de liberação da semente seja no momento de interrupção de vácuo que é exatamente no eixo horizontal fazendo com que a semente apresente componentes de velocidade e deslocamento horizontal.

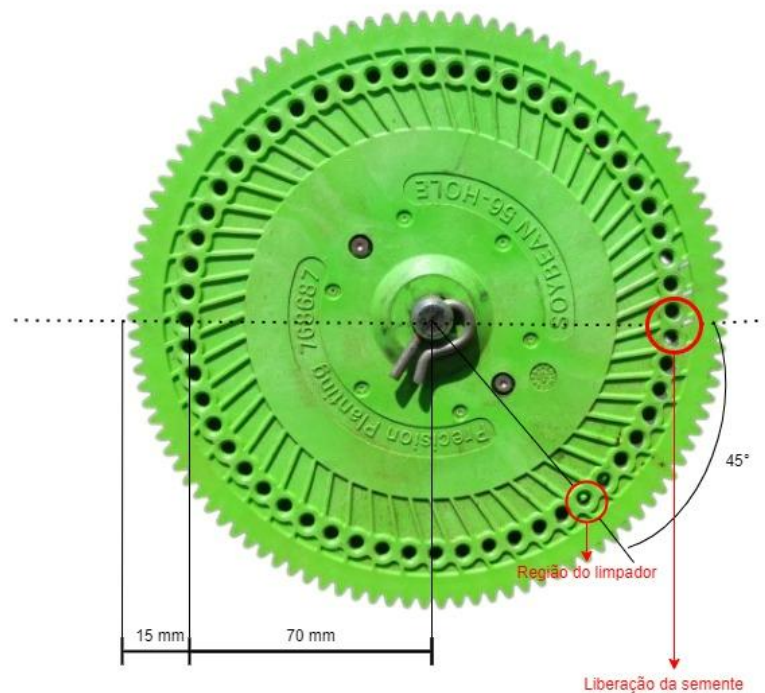
4.2.3 Características dimensionais de discos dosadores de sementes

A uniformidade de distribuição longitudinal de sementes é uma das características que mais contribui para a obtenção de uma disposição adequada das plantas e, conseqüentemente, de boa produtividade das culturas (KURACHI *et al.* 1989). A dosagem de sementes é realizada por discos de distribuição na maioria das semeadoras de precisão brasileiras. Esses discos desempenham a função principal das semeadoras, pois, são responsáveis por capturar, individualizar, dosar e liberar as sementes.

A determinação do tamanho dos orifícios em relação ao tamanho das sementes é essencial para garantir o funcionamento adequado dos dispositivos dosadores. Orifícios muito grandes em comparação com as sementes resultarão em maior formação de plantas duplas. Por outro lado, discos com orifícios pequenos podem não acomodar as sementes adequadamente, causando falhas no plantio.

O disco de distribuição de sementes utilizado no sistema vSet da Precision Planting é apresentado na Figura 30, juntamente com as características dimensionais utilizadas para realização da análise dinâmica da trajetória da semente.

FIGURA 30 - Dimensões do disco do dosador



Fonte: Arquivo do autor.

Vale ressaltar, que este disco é utilizado para cultivo de soja e apresenta 56 furos (alvéolos) com diâmetro de aproximadamente 4 mm. Além disso, o disco apresenta diâmetro total de 170 mm e distância entre o centro do eixo central e o centro do alvéolo é de 70 mm. Verifica-se que o ponto de liberação da semente é exatamente na interrupção do vácuo que é exatamente a 0° com o eixo horizontal.

4.2.4 Método de definição da velocidade linear resultante do disco dosador

A velocidade angular está relacionada diretamente com o movimento circular, o qual é o movimento de rotação de um corpo em torno de um eixo ao longo de uma trajetória circular de raio constante. Esse movimento pode ser uniforme, caso a velocidade de rotação seja constante, ou variado, caso sua velocidade sofra variações ao longo do tempo. A Equação 2.10 define a velocidade linear do disco dosador, dependente da velocidade angular da partícula do dosador que descreve movimento circular.

Neste estudo, conhecendo os componentes do sistema do dosador, sabe-se que o disco de sementes apresenta um número limitado de alvéolos (NA), então existem duas possibilidades para determinação da velocidade linear do disco dosador: (a) a variação da velocidade de semeadura (V_{px}) e (b) o número de sementes por metro (NS) que o produtor deseja semear. Primeiramente foi necessário encontrar a frequência de rotação do disco dosador utilizando a Equação 2.9 e então determinar a Velocidade linear do disco dosador utilizando a Equação 2.10.

$$f = \frac{(NS) \cdot (V_{px}) \cdot 1000}{(NA) \cdot 60} \quad (2.9)$$

$$Vd = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot f}{60} \quad (2.10)$$

Contudo, o valor de velocidade linear do disco dosador foi analisado de acordo com suas componentes verticais e horizontais de velocidade.

4.2.5 Análise das componentes da velocidade

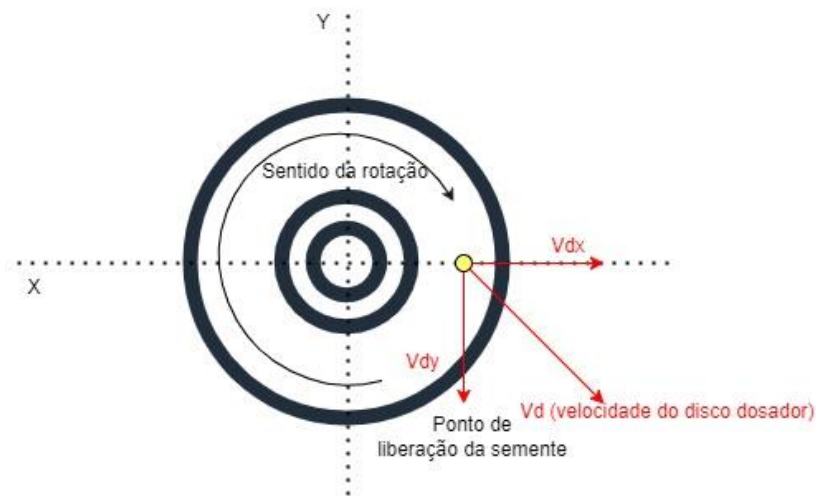
A semeadora em operação de plantio apresenta uma velocidade determinada pelo movimento de tração de um trator, assim como o disco do dosador apresenta uma velocidade rotacional em função da necessidade de entregar uma quantidade de sementes por metro linear. A semente quando aderida sobre o disco do dosador mediante o efeito da pressão negativa de ar para ser individualizada, possui velocidade angular igual a velocidade de rotação do disco.

Nesta fase do trabalho foram desenvolvidas as equações para prever a velocidade da semente a partir do ponto em que a mesma começa o seu movimento de queda livre desde um sistema dosador do tipo pneumático de disco vertical.

Quando as sementes são ejetadas do alvéolo do disco dosador (pelo cessamento da pressão negativa), elas se encontram em movimento relativo a um referencial em três planos distintos; neste caso, considera-se o carro de linha como referencial. No plano "x", o movimento é produzido pelo deslocamento da semeadora e pelo movimento da componente " Vdx " do disco do dosador; no plano "y", o movimento é produzido somente pela componente da velocidade " Vdy " do disco do dosador; e, no plano "z", não há componentes de velocidade.

Considerando a composição do movimento no instante imediato anterior ao início da queda livre, ponto onde ocorre a interrupção do vácuo e a semente é ejetada do disco, observa-se que o ângulo de ejeção forma 0° com a direção do deslocamento (eixo x). As componentes de velocidades consideradas para desenvolvimento deste trabalho são mostradas na Figura 31.

FIGURA 31 - Componentes da velocidade



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conhecendo a velocidade resultante do disco dosador, e o ângulo com que a semente é ejetada em relação ao eixo “x” ($\alpha = 0^\circ$) foi possível decompor as velocidades do disco do dosador para os eixos “x” e “y” a partir das Equações 2.11 e 2.12.

$$Vdx = Vd \cdot \cos \alpha \quad (2.11)$$

$$Vdy = Vd \cdot \sin \alpha \quad (2.12)$$

Como a velocidade de semeadura se dá na direção do eixo “x”, a velocidade dos componentes da semeadura no eixo “y” é considerada nula ($Vpy = 0$) em consonância com a hipótese VI do item 3.1.4. Portanto, as componentes de velocidade da semente correspondentes aos eixos “x” e “y” são mostradas nas Equações 2.13 e 2.14.

$$Vsx = Vdx = (Vd \cdot \cos \alpha) \quad (2.13)$$

$$Vsy = Vdy = (Vd \cdot \sin \alpha) \quad (2.14)$$

O módulo do vetor velocidade resultante da semente (V_s), no instante imediato anterior ao início do movimento de queda livre é determinado a partir da Equação 2.15.

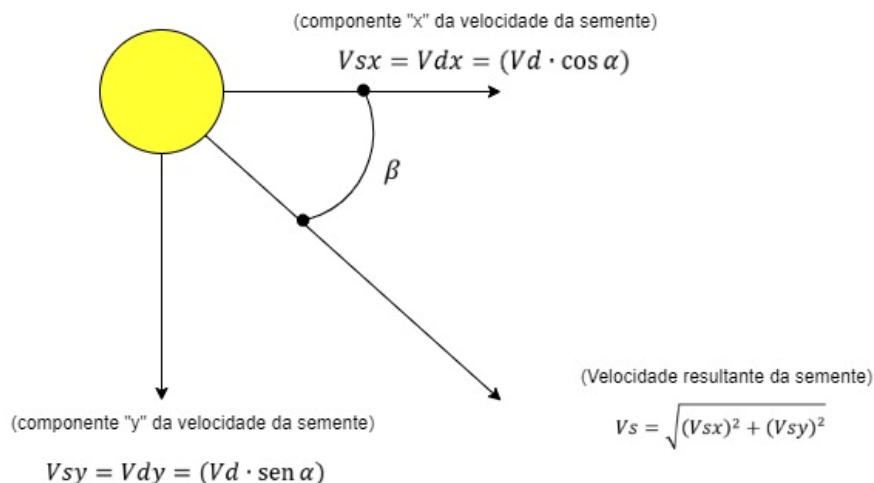
$$V_s = \sqrt{(V_{sx})^2 + (V_{sy})^2} \quad (2.15)$$

A obtenção da velocidade no instante imediato anterior à ejeção da semente a partir do disco dosador, em que inicia a queda livre da semente através do tubo condutor vai determinar velocidade de queda e a velocidade final da semente ao atingir o sulco de semeadura.

4.2.6 Determinação do ângulo de liberação da semente

A partir dos valores das componentes da velocidade da semente é possível determinar o ângulo de liberação da semente, ou seja, o ângulo " β " que determina a direção na qual a semente irá movimentar-se após liberada do disco dosador. A Figura 32 representa as componentes da velocidade da semente uma vez liberada do disco dosador, enquanto a Equação 2.16 fornece o valor do ângulo de liberação da semente.

FIGURA 32 - Componentes de módulo e direção da semente



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$\beta = \arctan \frac{V_d \cdot \sin \alpha}{V_d \cdot \cos \alpha} \quad (2.16)$$

4.2.7 Determinação da trajetória da semente

Por meio das equações do movimento mencionadas no quadro 3 no tópico 2.7.1, foi possível prever a trajetória de queda da semente. De forma geral, foi caracterizado o comportamento da semente em movimento de queda livre. Para este fim, calcula-se o tempo de queda da semente para um dado deslocamento (X) e uma dada velocidade resultante de semente (V_s), para isso, utiliza-se a Equação 2.17.

$$t = \frac{X}{V_s} \quad (2.17)$$

Além disso, a análise prossegue com o cálculo da velocidade vertical da semente em queda, a partir da Equação 2.7, com as seguintes considerações:

$$S = S_o + V_o \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2} \quad (2.18)$$

Onde:

$$S_o = 0;$$

$$S = (Y_o);$$

$$a = g \text{ (Aceleração da gravidade (m/s}^2\text{))};$$

Substituindo a Equação 2.17 na Equação 2.18, obtém-se a Equação 2.19, a qual representa a trajetória seguida pela semente a partir de sua velocidade de partida uma vez liberada do disco dosador, incluindo a altura de queda, esta verificada a partir da altura onde a semente é liberada do disco até a altura de entrega ao sulco de semeadura.

$$\left(\frac{-g}{2 \cdot V_{sx}^2}\right) \cdot X^2 + \left(\frac{V_{sy}}{V_{sx}}\right) \cdot X + (Y_o) = 0 \quad (2.19)$$

A Equação 2.19 obtida se aproxima da Equação 2.20 que expressa a fórmula geral da parábola; portanto, a trajetória seguida pela semente aproxima-se de uma parábola.

$$a \cdot X^2 + b \cdot X + c = 0 \quad (2.20)$$

4.2.8 Determinação da quantidade de movimento da semente ao ser liberada

A quantidade de movimento é uma grandeza física da dinâmica medida em ($Kg \cdot m \cdot s^{-1}$), calculada a partir da multiplicação da massa de um corpo pela sua velocidade instantânea em metros por segundo. Essa grandeza é vetorial, apresentando módulo, direção e sentido, e pode ser obtida pela Equação 2.21.

$$\vec{Q} = m \cdot \vec{V}_s \quad (2.21)$$

Assim, quanto maior for a massa da semente, maior será a sua quantidade de movimento, como também quanto maior for a velocidade da semente, maior será a sua quantidade de movimento. Caso o corpo esteja parado, a quantidade de movimento é nula.

Por meio da variação da quantidade de movimento é possível entender o Teorema do Impulso, o qual a semente está submetida ao entrar em contato com a parede do tubo condutor. O contato da semente, que possui uma determinada quantidade de movimento gera um choque na parede do tubo condutor, ocasionando mudança de velocidade, direção e sentido do movimento da semente, cuja trajetória se torna mais complexa de prever.

4.2.9 Determinação da velocidade da semente ao impactar o solo livremente

A velocidade final da semente entregue no sulco de semeadura se torna incerta considerando a complexidade da predição da trajetória da semente pela adoção do movimento em queda livre. Vários são os fatores que influenciam essa velocidade final como, por exemplo: a variabilidade na dosagem (população de sementes); as interações entre a semente e a superfície do tubo condutor, ricochetes e rolamentos; as vibrações inerentes à dinâmica do carro de linha da semeadora; e, a variação da direção da semente em função da angulação do terreno. Para efeito de habilitar uma predição aproximada do comportamento em queda da semente, as hipóteses do item 3.1.4 habilitam uma simplificação dos fatores de incerteza para uma modelagem determinística.

De acordo com esses fatores, a Equação 2.22 fornece a velocidade de queda considerando o “eixo y” e a Equação 2.13 fornece a velocidade considerando “eixo x”. A partir da Equação 2.23, é possível identificar a velocidade final da semente até chegar ao solo, considerando trajetória livre de saída do dosador, sem que a semente entre em contato com nenhum componente, ou seja, a velocidade final da semente quando toca o solo percorrendo sua trajetória de saída do disco do dosador.

$$(2.22)$$

$$V_{sy_{Final}}^2 = V_{sy}^2 + 2 \cdot (-g) \cdot (-Y_0)$$

$$V_{S_{solo}} = \sqrt{(V_{sx})^2 + (V_{sy_{Final}})^2} \quad (2.23)$$

Portanto, é importante lembrar que a trajetória da semente sofre variações em função dos possíveis fatores que venham a gerar incertezas no movimento das sementes através da condução por meio do tubo condutor.

4.2.10 Caracterização analítica do tubo condutor

A soja ao ser singularizada pelo dosador, é conduzida individualmente até o sulco de semeadura aberta onde será depositada. Essa condução envolve o tubo condutor de semente o qual possui dimensões fixas de comprimento, ângulo, largura de bocal de entrada da semente e largura da porta de saída da semente. Além disso, é produzido em material plástico liso para facilitar a condução da semente pelo seu interior. O tubo condutor utilizado nesta análise dinâmica de modelagem da condução da semente pode ser visto na Figura 33 juntamente com suas dimensões.

FIGURA 33 - Dimensões do tubo condutor de sementes



Fonte: Fotos tiradas pelo autor de um condutor de semeadora.

Da mesma forma, a inclinação angular do tubo condutor pode ser vista na Figura 34. Verificou-se uma inclinação padrão desde a entrada do tubo até a sua região média, cujo ângulo é de 14° com o eixo y, portanto, para as regiões inferiores, identifica-se uma grande variação angular, que dificulta o desenvolvimento dinâmico do estudo. Para isso, considera-se para fins de cálculos deste trabalho ângulo superior de 14° como mencionado e ângulo de $25,6^\circ$ para região média a inferior do tubo em relação ao eixo y.

FIGURA 34 – Dimensões do tubo condutor utilizado para os cálculos da análise dinâmica

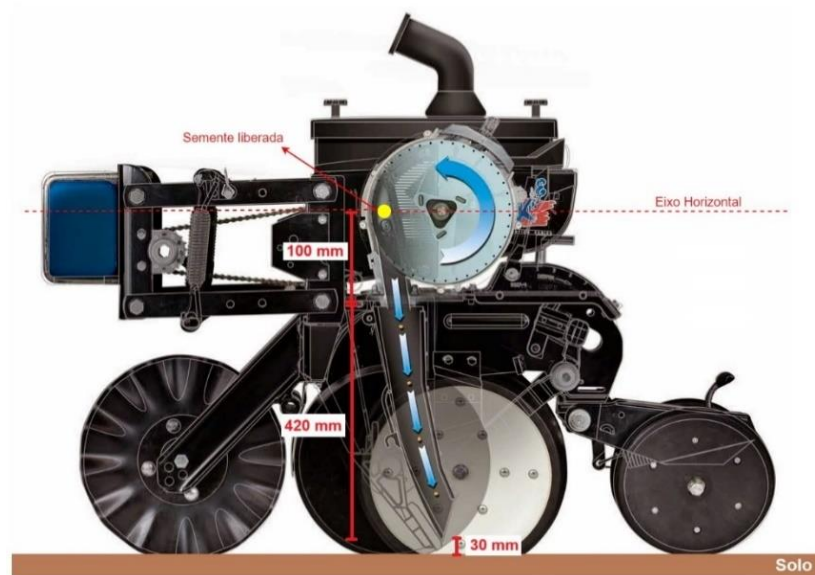


Fonte: Foto tirada pelo autor de um condutor de semeadora.

A maioria dos tubos condutores de sementes presentes no mercado, possuem sensores com fotocélula que realizam a contagem de sementes que foram introduzidas na área de plantio. Dessa forma, erros operacionais de entupimentos de linhas de semeaduras podem ser evitados em tempo real. Um sinal sonoro é emitido no interior da cabine do trator junto ao monitor sempre que, existir algum problema relacionado a semeadura, isso auxilia os operadores na execução correta da atividade.

A Figura 35 exemplifica a altura de queda de semente desde o instante de liberação pelo disco do dosador.

FIGURA 35 - Exemplificação da altura de queda de semente



Fonte: Elaborado pelo autor (adaptado de FRANGETTO, 2014).

Neste estudo, tomou-se como premissa a altura de queda da semente igual a distância entre o alvéolo de saída da semente do dosador até a entrada do tubo condutor (100 mm), a altura do tubo condutor (420 mm) e a distância entre o solo e a saída do tubo condutor (30 mm). Assim sendo, a altura de queda total da semente é considerada para fins de cálculos ($Y_0 = 550 \text{ mm}$).

4.2.11 Colisão da semente na parede do tubo condutor

A semente em plantio está sujeita à influência de vários fatores durante a operação; uma delas é o efeito das colisões das sementes com a parede interior do tubo condutor. Estas colisões e as respectivas incertezas resultam em distintos tempos de queda e, portanto, diferentes espaçamentos entre localização de deposição. Para isso, é importante que o tubo condutor seja muito bem projetado, a fim de habilitar à entrega de sementes de forma mais homogênea.

As colisões entre a semente e o tubo condutor normalmente acontecem, podendo gerar incerteza na entrega final da semente no sulco. Essas colisões geram uma interação mútua entre os corpos envolvidos, ocasionando alteração no movimento da semente, produzindo uma troca de momento e energia. Quando há conhecimento do movimento dos corpos antes, ou após a colisão, é possível obter informações de características do movimento.

Neste caso, sabendo-se a velocidade de saída da semente no instante imediato ao ser liberada pelo disco dosador calcula-se a velocidade instantânea anterior a colisão no tubo condutor. Assim, assumindo o coeficiente de restituição como mencionado no tópico 2.1.1.5, obtém-se a velocidade da semente após a primeira colisão. Da mesma forma, para as colisões seguintes, utiliza-se a velocidade anterior à colisão e o coeficiente de restituição conhecido para identificar a nova velocidade da semente, assim sucessivamente para as demais colisões, até encontrar a velocidade final da semente ao sair do tubo condutor e ser entregue ao sulco de semeadura.

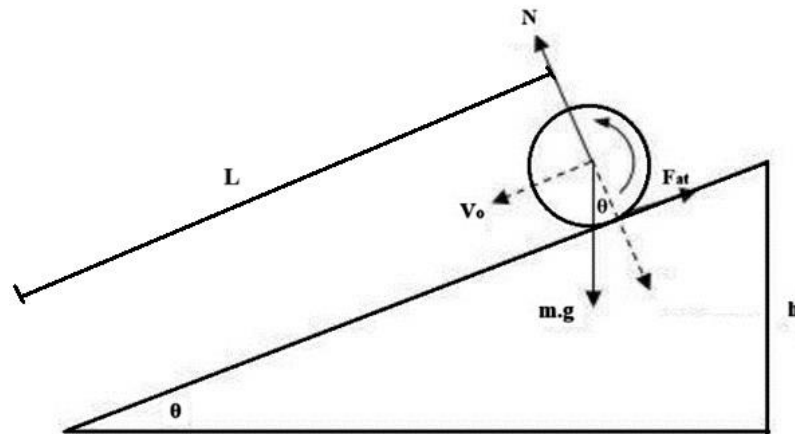
De modo geral, esse estudo trata de uma análise determinística específica de condução da semente pelo interior do tubo condutor, podendo haver formas distintas de colisões, variando através de vibrações provenientes no carro de linha da semeadora, assim como considerações de colisões em três dimensões, entre vários outros fatores que podem vir a alterar a trajetória da semente.

4.2.12 Rolamento completo da semente no interior do tubo condutor

Após assumir a trajetória de queda livre pelo interior do tubo condutor, a semente sofre colisões com as paredes internas do tubo, fazendo com que sua além da mudança de trajetória, dissipa sua energia após cada colisão, por consequência reduzindo a sua velocidade. No entanto, há um certo número de colisões, que fazem com que a semente perca grande parte da sua energia cinética e venha a cessar as colisões por conta de que seu deslocamento no eixo “x” seja menor que o raio da semente de soja. Tomando esse fator como premissa, encontrou-se o número de colisões da semente para diferentes velocidades de deslocamento da semeadora.

Por isso, no instante final da última colisão, assume-se que a semente passa a se mover em rolamento perfeito, sem deslizamento, percorrendo assim a trajetória da porção final da geometria do tubo condutor. Para isso, utilizou-se a 2ª Lei de Newton para o balanceamento das energias, visando encontrar a velocidade final da saída da semente sobre o tubo condutor e a velocidade com que a semente impacta sobre o solo. A Figura 36 mostra um modelo esquemático considerando uma esfera que rola em um plano inclinado.

FIGURA 36 - Modelo esquemático do rolamento de uma esfera em um plano inclinado



Fonte: Elaborado pelo autor.

A decomposição de forças a partir do modelo esquemático resulta em:

$$m \cdot a_{cm} = m \cdot g \cdot \text{sen } \theta - F_{at} \quad (2.24)$$

Além disso, a equação do torque resultante é definida pelo torque da força de atrito:

$$\tau_{res} = I_{cm} \cdot \alpha \quad (2.25)$$

$$\tau_{res} = \cancel{\tau_{mg}} \cdot \cancel{\tau_N} \cdot \tau_{Fat} \quad (2.26)$$

$$\tau_{res} = \tau_{Fat} \cdot r_S \quad (2.27)$$

Como não ocorre deslizamento, a aceleração do centro de massa da semente é definida pela relação da aceleração do centro de massa pelo raio da semente:

$$\alpha = \frac{a_{cm}}{r_S} \quad (2.28)$$

Relacionando as Equações 2.25, 2.27 e 2.28 obtém-se a força de atrito estático que age sobre o rolamento da semente:

$$F_{at} = \frac{I_{cm} \cdot a_{cm}}{r_S^2} \quad (2.29)$$

Logo, associando as Equações 2.24 e 2.29, encontra-se a aceleração do centro de massa da semente:

$$a_{cm} = \frac{g \cdot \text{sen } \theta}{\left(1 + \frac{I_{cm}}{m \cdot r_s^2}\right)} \quad (2.30)$$

Com isso, verifica-se que quanto maior for o momento de inércia da semente, menor será a aceleração do centro de massa. Portanto, conectando as Equações 2.29 e 2.30 obtém-se a força de atrito em função da massa, aceleração da gravidade, raio e momento de inércia da semente e o ângulo das componentes:

$$F_{at} = \frac{m \cdot g \cdot \text{sen } \theta}{\left(1 + \frac{m \cdot r_s^2}{I_{cm}}\right)} \quad (2.31)$$

Para finalizar, a decomposição das energias inicial e final fornecem a velocidade final da semente ao impactar o solo.

$$Ec_{inicial} + Ep_{inicial} = Ec_{final} + Ep_{final} \quad (2.32)$$

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot V_o^2 + \frac{1}{2} \cdot I_{cm} \cdot \omega_o^2 + m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_f^2 + \frac{1}{2} \cdot I_{cm} \cdot \omega_f^2 \quad (2.33)$$

Como não ocorre deslizamento considera-se $\omega_o = V_o/r_s$. Portanto, a velocidade final da semente é calculada pela expressão:

$$V_f^2 = V_o^2 + \frac{2 \cdot g \cdot h}{\left(1 + \frac{I_{cm}}{m \cdot r_s^2}\right)} \quad (2.34)$$

$$V_f^2 = V_o^2 + 2 \cdot \frac{g \cdot \text{sen } \theta}{\left(1 + \frac{I_{cm}}{m \cdot r_s^2}\right)} \cdot L \quad (2.35)$$

De forma geral, a equação que fornece a velocidade final da semente ao impactar o solo se aproxima com a equação de Torricelli.

$$V^2 = V_o^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta S \quad (2.36)$$

4.3 RESULTADOS OBTIDOS DO MODELO DETERMINÍSTICO

Nesta seção estão apresentados os resultados, que consistem na obtenção das configurações de velocidade da semente ao ser dosada e liberada pelo disco do sistema dosador. Posteriormente são mostrados a variação na trajetória e velocidade da semente no interior do tubo condutor em função das colisões, além da velocidade final da semente ao impactar o solo. Por fim, indica-se a energia total da semente variando com o número de colisões no tubo condutor. Dessa forma, buscou-se esclarecer os resultados como soluções dos objetivos propostos.

4.3.1 Velocidade anterior da semente antes da 1^o colisão com o interior do tubo condutor

A velocidade com que a semente é liberada está diretamente relacionada à velocidade angular do disco dosador. Ao identificar o sentido de rotação do disco, suas características dimensionais, o número desejado de sementes a serem plantadas por metro linear e a velocidade de semeadura, tornou-se possível determinar a velocidade angular com a qual o disco gira. Ao obter a velocidade angular, a mesma foi convertida para a velocidade linear, permitindo determinar a velocidade no exato momento da liberação da semente pelo disco.

Dessa forma, como a velocidade está diretamente relacionada com o ângulo de liberação, ou seja, a semente é liberada considerando 0° com o eixo horizontal, faz com que haja apenas velocidade em “x”. Após o instante de liberação a semente assume velocidade em “y” em função da aceleração da gravidade que atua sobre a mesma, na qual a velocidade que atua sobre a semente em queda no eixo “y” será sempre a mesma. A variação se dá pela velocidade em “x” que se modifica conforme a necessidade de velocidade de semeadura. A Tabela 1 mostra a decomposição da variação da velocidade de liberação da semente pelo disco dosador e a velocidades resultantes da semente anterior a primeira colisão.

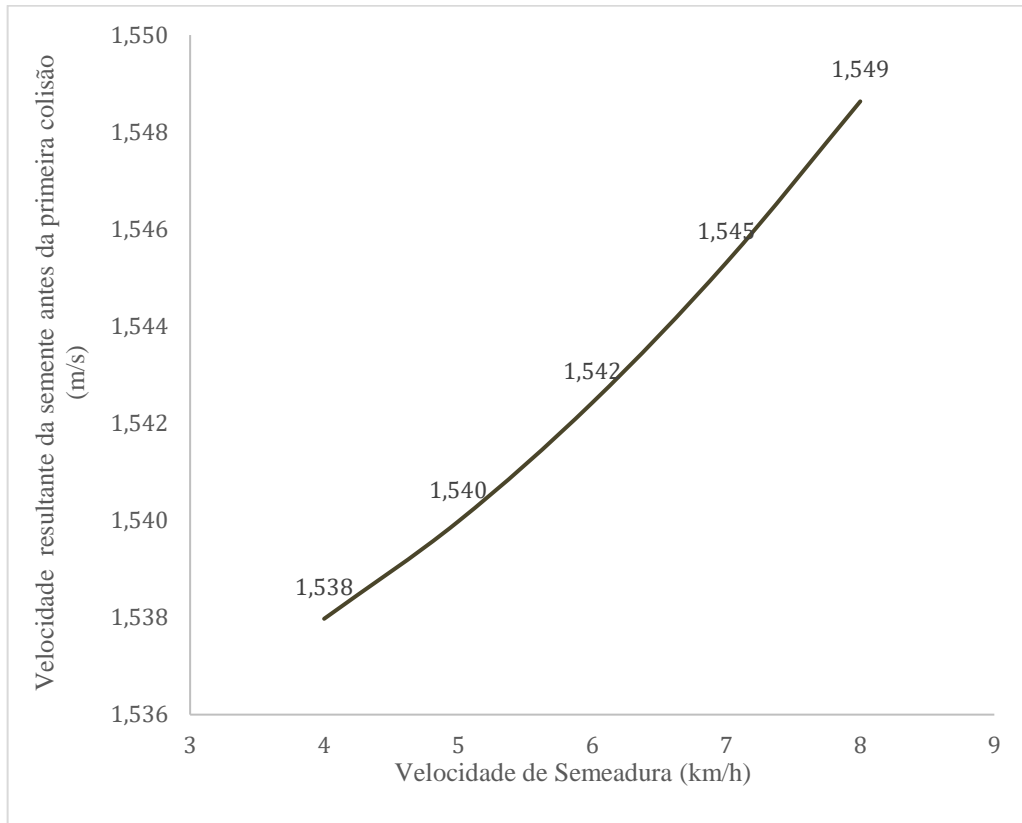
TABELA 1: Decomposição da variação da velocidade de liberação da semente pelo disco dosador

Velocidade de semeadura	Vel. Liberação da Sem. Eixo X	Vel. Liberação da Sem. Eixo Y	Vel. Sem. eixo Y em queda livre	Vel. Resultante da semente anterior a 1 ^o colisão
4 km/h	0,1047 m/s	0 m/s	1,5344 m/s	1,5380 m/s
5 km/h	0,1309 m/s	0 m/s	1,5344 m/s	1,5400 m/s
6 km/h	0,1571 m/s	0 m/s	1,5344 m/s	1,5424 m/s
7 km/h	0,1833 m/s	0 m/s	1,5344 m/s	1,5453 m/s
8 km/h	0,2094 m/s	0 m/s	1,5344 m/s	1,5486 m/s

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 37 mostra a curva da variação das velocidades resultantes da semente antes da primeira colisão com o interior do tubo condutor.

FIGURA 37 – Variação das velocidades resultantes da semente antes da primeira colisão com o interior do tubo condutor, em função da velocidade de semeadura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que, conforme varia a velocidade de semeadura, ocorre uma leve inclinação da curva da velocidade de liberação da semente. Assim, a velocidade de liberação da semente assume comportamento não completamente linear, mas com um leve aclave. Isso acontece, porque o disco dosador deve acompanhar a velocidade de semeadura, girando a uma velocidade proporcional à velocidade de deslocamento do trator que efetua a tração da semeadora, e também determinada pelas configurações de distribuição de sementes do implemento. A velocidade de percurso do conjunto (trator + semeadora) deve ser rigorosamente balanceada com a velocidade de rotação com que o disco dosador trabalha para que a distribuição seja feita no momento exato e com sementes equidistantes.

4.3.2 Variações na trajetória da semente em função das colisões no interior do tubo condutor

Como a semente é liberada do disco do dosador através da interrupção do vácuo, ela passa a ser transportada até o solo por queda livre, ou seja, assume a aceleração da gravidade. Porém, essa queda gera colisões entre a semente e as paredes do tubo condutor, fazendo com que a trajetória da semente seja variável. Este estudo identificou a trajetória da semente considerando o deslocamento da semente nos eixos “x” e “y” apenas, no percurso interior ao tubo condutor. Além disso, a semente para de colidir com o tubo quando o deslocamento no eixo “x” seja menor ou igual ao valor do diâmetro da semente ($D_f \leq 0,0065 \text{ m} = \varnothing \text{ semente}$). A Tabela 2 indica o número de colisões para as distintas velocidades de semeadura, juntamente com a distância (D_f) percorrida no eixo “x” no instante da última colisão antes de iniciar o rolamento da semente pelo tubo e a altura (H_f) no instante da última colisão e início de rolamento.

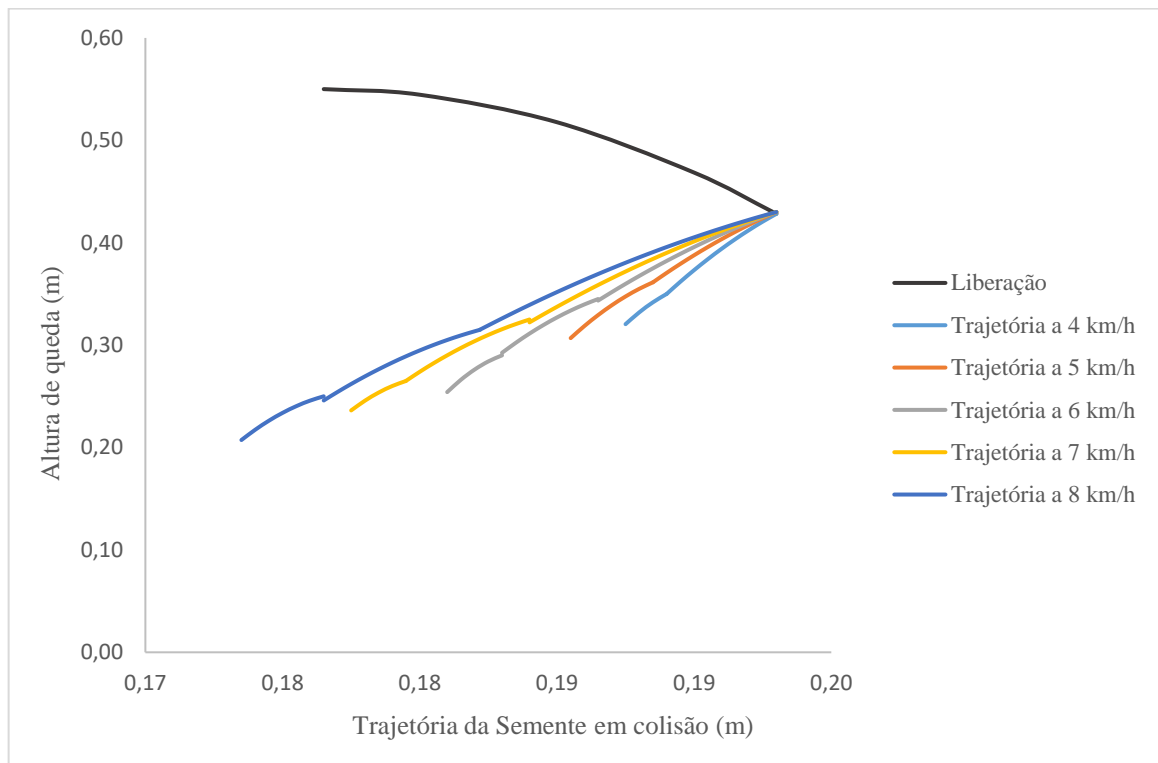
TABELA 2 - Número de colisões para distintas velocidades de semeadura

Velocidade de semeadura	Número de colisões	$D_f \leq 0,0065 \text{ m}$	H_f
4 km/h	3	0,0051 m	0,32 m
5 km/h	3	0,0063 m	0,31 m
6 km/h	4	0,0043 m	0,25 m
7 km/h	4	0,0048 m	0,23 m
8 km/h	4	0,0052 m	0,21 m

Fonte: Elaborado pelo autor.

A cada colisão que a semente enfrenta contra a parede do tubo condutor, há a mudança da trajetória e velocidade em função da forma com que a semente chega até o tubo condutor. A Figura 38, representa as variações dessa trajetória da semente obtidas por meio do equacionamento obtido no desenvolvimento dinâmico, ou seja, para cada colisão ocorre um novo equacionamento para modelagem do percurso da semente.

FIGURA 38 - Variação da trajetória da semente em função das colisões

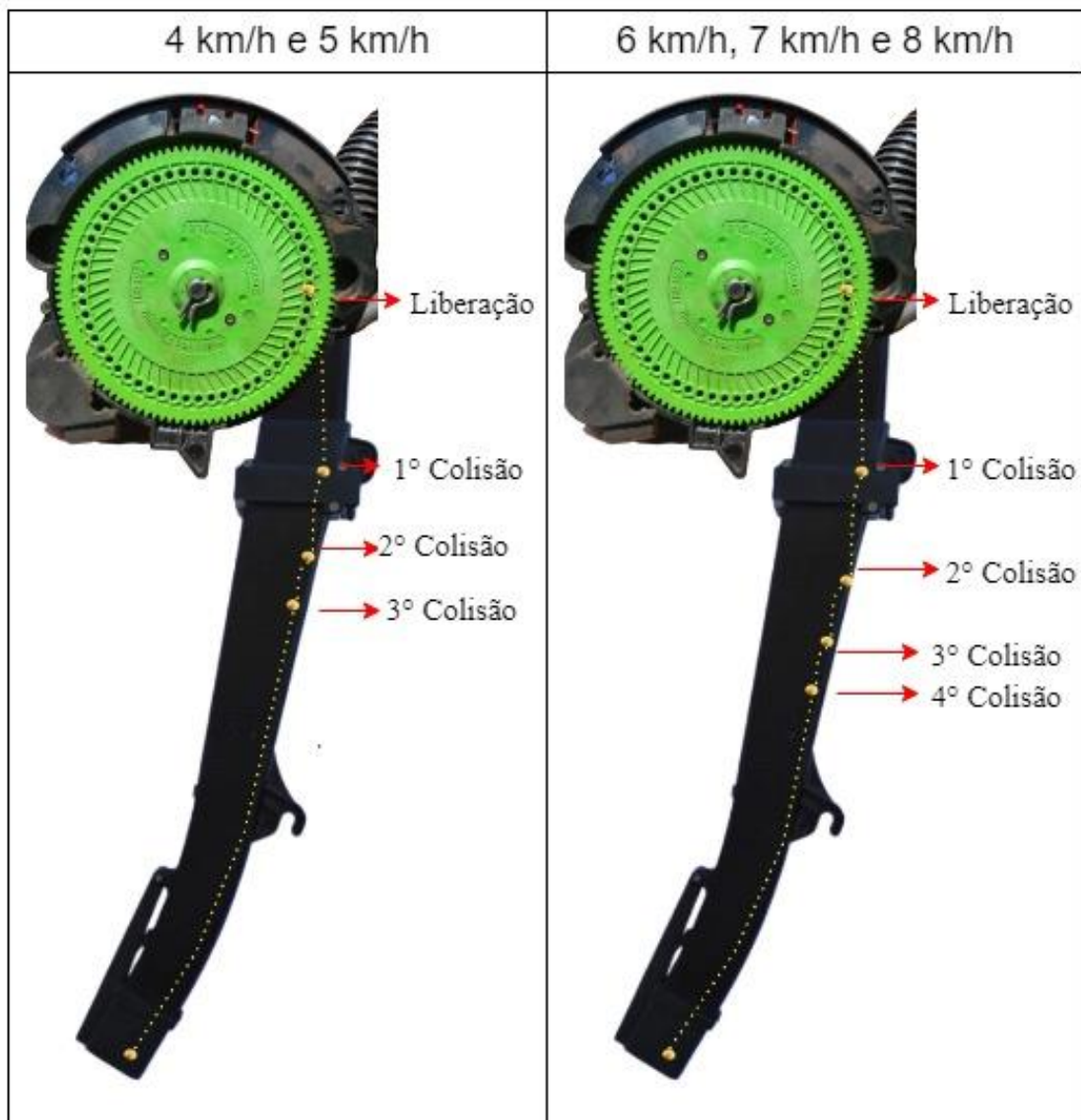


Fonte: Elaborado pelo autor.

Como visto na Figura 38, cada velocidade de semeadura resulta em uma trajetória para a semente pelo interior do tubo condutor, com isso, é importante salientar que após esse deslocamento observado, a semente ainda percorre uma distância determinada na forma de rolamento, guiada pela geometria do tubo condutor.

A Figura 39 mostra uma ilustração da trajetória da semente em função das colisões ocasionadas pelo aumento da velocidade de semeadura, ou seja, o aumento da velocidade de semeadura ocasiona um aumento no número de colisões da semente no interior do tubo gerando atraso ou antecipação das mesmas, fato também identificado em (COPETTI, 2003).

FIGURA 39 - Variação da trajetória da semente em função do número de colisões no interior do tubo condutor



Fonte: Elaborado pelo autor.

É notada uma leve variação na altura das colisões em proporção à velocidade de partida da semente desde o disco dosador, fato que se comprova pela velocidade de deslocamento da semente serem diferentes para distintas velocidades de semeaduras. Também foi visto que, enquanto para as velocidades de deslocamento 4 km/h e 5 km/h a semente colide 3 vezes no interior do tubo, para as velocidades de 6 km/h, 7 km/h e 8 km/h ocorre 4 colisões, fator que aumenta com a elevação da velocidade de semeadura.

4.3.3 Velocidade da semente durante a trajetória até o sulco de semeadura

A velocidade da semente é influenciada pelas condições que ela se encontra após ser liberada do disco do dosador. O ponto de partida é a velocidade que ela se desloca presa no disco, seguidamente ela passa a assumir uma velocidade maior no sentido do eixo “y” pelo fato da aceleração da gravidade. Porém, como a semente não está livre de colisões e mudança de direções, cada colisão que a mesma sofre, gera uma nova equação de trajetória, e módulo de velocidade, isso torna o desenvolvimento equacional complexo.

Neste estudo considerou-se o coeficiente de restituição da semente da soja obtido no desenvolvimento em Horabik *et al.* (2017), para efeitos de cálculos e variações de velocidades, ou seja, cada colisão da semente gera uma atenuação na velocidade da semente, fazendo com que o deslocamento no eixo horizontal se torne inferior, passando então do estado de colisão para rolamento da semente pelo interior do tubo. Neste caso, quando a semente começa a rolar pelo interior do tubo, sua velocidade aumenta fazendo com que sua chegada ao solo seja com velocidades maiores quando comparadas com a velocidade de liberação da semente pelo disco do dosador. A Tabela 3 expressa detalhadamente os valores de velocidades da semente desde a liberação pelo disco dosador, velocidades após colisões, velocidade de saída do tubo condutor e velocidade de contato da semente com o solo.

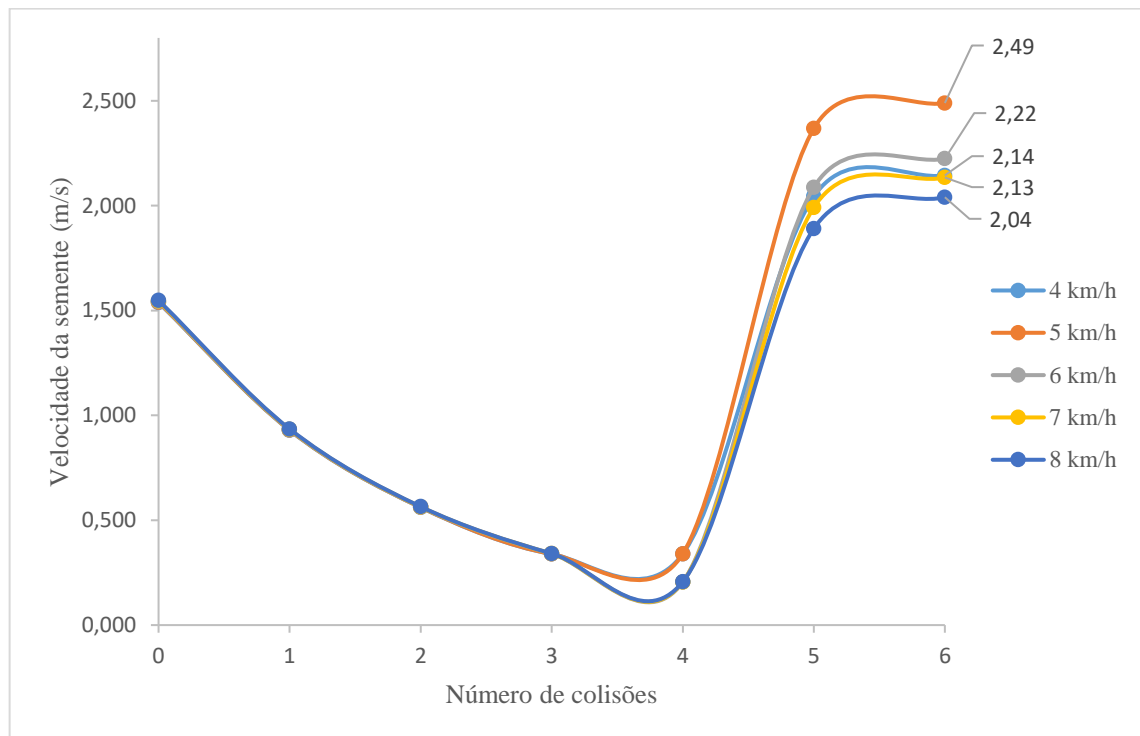
TABELA 3 – Predição da velocidade de queda da semente em função da posição para distintas velocidades de semeadura, segundo modelo determinístico deste trabalho

Posição	Velocidade de semeadura	Velocidade da semente (m/s)				
		4 km/h	5 km/h	6 km/h	7 km /h	8 km/h
0	Anterior a 1º colisão	1,538	1,540	1,542	1,545	1,549
1	1º colisão	0,929	0,930	0,932	0,933	0,935
2	2º colisão	0,561	0,562	0,563	0,564	0,565
3	3º colisão	0,339	0,339	0,340	0,341	0,341
4	4º colisão	-	-	0,205	0,206	0,206
5	Vel. Sem. Saída do Tubo	2,044	2,368	2,088	1,992	1,891
6	Vel. Sem. Impactar o Solo	2,145	2,489	2,224	2,134	2,040

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verificou-se a redução da velocidade da semente após as colisões para cada velocidade de semeadura analisada e o aumento da velocidade após o rolamento da semente. Essa variação na velocidade da semente em função da posição pode ser vista na Figura 40.

FIGURA 40 - Variação da velocidade da semente em função do número de colisões



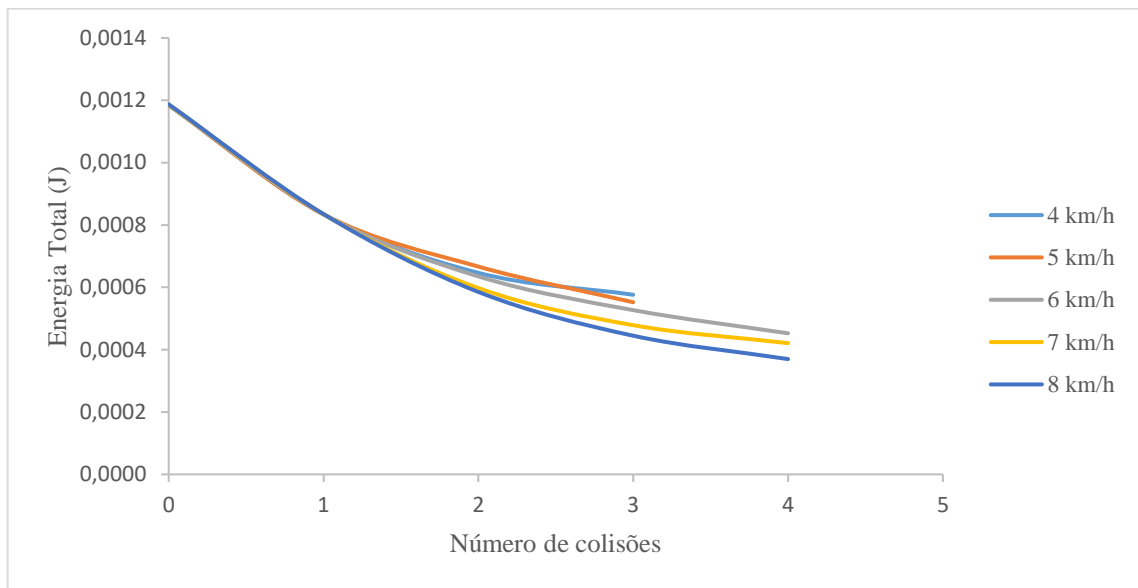
Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o comportamento das curvas de variação de velocidade da semente na Figura 37, identificou-se as velocidades de colisões próximas a ponto de sobreporem as curvas, ocorrendo maior diferença nas velocidades quando a semente deixa de colidir e assume o rolamento de descida pelo tubo condutor. Essa variação é gerada pela diferença de altura entre as colisões para velocidades de semente distintas, considerando que os cálculos de velocidades finais foram realizados a partir da variação de energia potencial e energia cinética.

4.3.4 Energia total da semente variando em função do número de colisões

Os cálculos de velocidades a partir do início do rolamento da semente até a chegada ao solo, foram realizados pela variação de energia potencial e energia cinética. O mesmo método é visto na Figura 41, a qual demonstra a variação de energia total, comparando as velocidades de semente analisadas, apenas para os instantes em que as sementes colidiram nas paredes do tubo condutor.

FIGURA 41 - Variação da energia total da semente sobre o número de colisões



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como a energia potencial é a mesma para todos os casos no instante de liberação da semente pelo disco, visto que, se trata da mesma altura de interrupção do vácuo e liberação da semente, ambos os casos apresentam a mesma energia inicial, variando apenas a energia cinética que depende da velocidade que é distinta para cada caso, porém essa diferença não é vista pois essa variação de velocidade de liberação é mínima, cuja se trata de escala de centésimos. Logo essa variação é vista a partir da primeira colisão, pois, cada velocidade de liberação, mesmo que extremamente pequena resulta em uma altura da segunda, terceira e quarta colisão diferente para cada situação.

4.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS E FONTES DA LITERATURA

Com base nos resultados obtidos, este tópico aborda uma comparação entre os efeitos alcançados e as fontes referências sob grande relevância na área de máquinas agrícolas, em específico as semeadoras. Assim, este estudo favoreceu a identificação da trajetória da semente de forma determinística, por meio da decomposição das velocidades da semente.

Conhecendo o sistema de dosadores com presença de discos de distribuição de sementes, identificou-se que para cada densidade de plantas por hectare, há uma necessidade de variação de velocidade tangencial do disco dosador para que se atinja a entrega do número de sementes por metro desejado. Para isso, foram identificadas as velocidades tangenciais nos deslocamentos de 4; 5; 6; 7 e 8 km/h, respectivamente 1,538; 1,540; 1,542; 1,545 e 1,549 m/s, velocidades superiores ao limite aceitável segundo Pacheco *et al.* (1996) que cita em seu estudo 0,29 m/s. Da mesma forma, Jasper *et al.* (2011), analisou a influência da velocidade tangencial do disco dosador e não encontrou intervenções significativas na população inicial e porcentagem de espaçamentos falhos com o incremento da velocidade tangencial do disco de distribuição de sementes.

Assim como, desenvolvida a análise do equacionamento dinâmico, por meio das equações do movimento das leis da física, Pacheco *et al.* (1996), explica em seu estudo, que no instante em que a semente é liberada do disco do dosador, ela adquire em queda livre, componentes verticais de velocidade em função da aceleração da gravidade e uma componente horizontal decorrente da velocidade de avanço da semeadora.

Os resultados apresentam um aumento no número de colisão conforme o aumento da velocidade de deslocamento da semeadora. Fato que também é observado por Silva *et al.* (2000), que relata que o deslocamento da semente dentro do tubo condutor as sementes sofrem vibrações, provocadas pela movimentação da máquina, alterando o tempo de queda livre das sementes até o solo, trazendo a desuniformidade no espaçamento no sulco de semeadura.

Da mesma maneira, como verificado nos resultados o aumento de velocidade de avanço da semeadora aumenta a velocidade periférica do disco dosador, logo aumenta a velocidade em que a semente é liberada, por consequência, gera uma maior ocorrência de colisões em condutores retos e de pequenos diâmetros, visto também em um estudo realizado por Carpes (2014), onde demonstra que o ângulo de entrada da semente no tubo condutor não deve ser superior a 6°.

Da mesma forma, como os resultados obtidos neste desenvolvimento determinístico, Pacheco *et al.* (1996) identificaram que o aumento da velocidade periférica do disco dosador resulta em um ponto de colisão das sementes próximo à extremidade da entrada do tubo condutor, o que pode levar a uma intensificação das colisões dentro do tubo.

5 CONCLUSÃO

Dados o cenário importantíssimo do agronegócio dentro da composição da economia brasileira, encontram-se as tecnologias presentes nas máquinas e implementos de trabalho com a terra. No âmbito de semeadoras precisas, o desenvolvimento de inovações está em alta, otimizando os processos de produção e minimizando os possíveis desperdícios, favorecendo o homem do campo desde o pequeno, médio e grande produtor.

O presente trabalho, abordou as semeadoras precisas no mercado mundial, para identificação dos modos de dosagem/singulação e condução de sementes de soja. Baseado nesta proposta, o objetivo principal, foi desenvolver a estrutura funcional do sistema, buscando entender as funções principais e parciais dos mecanismos dosador e condutor de sementes. Juntamente com essa proposta, foi feita a predição de uma análise determinística da dinâmica da semente, descrevendo cada uma das etapas de dosagem até a entrega da semente no solo, considerando possíveis perdas que envolvem diretamente a homogeneidade da semeadura.

A estrutura funcional desenvolvida permitiu analisar soluções de dosadores e transportadores de sementes disponíveis no mercado resultando no entendimento da cadeia de ações necessárias para efetuar a dosagem e a condução da semente, até o sulco de plantio. Além disso, foi possível mostrar o comportamento da trajetória da semente de soja, perante dois graus de liberdade, considerando a soja como uma partícula em queda livre que sofre colisões e mudança de coordenadas a cada contato com o equipamento. Portanto, foi determinada a variação do comportamento da semente para distintas velocidades de deslocamento da semeadora e pôr fim a variação de energia total da semente em movimento, ademais, a velocidade que a semente é entregue no solo.

Vale ressaltar a importância da pesquisa científica para a inovação tecnológica e expansão do conhecimento, possibilitando a solução de problemas como a melhoria na entrega de sementes realizada por semeadoras precisas. A atual perspectiva do produtor é colocar a semente no solo no local exato de forma homogênea e precisa em maiores velocidades. Sabe-se que a janela de plantio é curta e necessita de semeadoras eficientes em velocidades maiores.

No entanto, a principal dificuldade encontrada neste trabalho foi a busca por referências acadêmicas que explorassem as possíveis variações de dinâmica da semente no interior do tubo condutor. Isso exigiu esforços para realização desta modelagem, cuja foi levado em consideração vários parâmetros de predição e análise determinística.

Por fim, este desenvolvimento permitiu uma análise detalhista sobre a dinâmica de partículas e o seu comportamento no espaço, possibilitando auxiliar trabalhos futuros na busca da comprovação desta análise determinística, seja primeiramente através de simulações computacionais e posteriormente aplicação prática em teste de campo em semeadoras. Além disso, este trabalho reflete uma contribuição para o aprendizado e crescimento acadêmico quanto pessoal, em preparação para enfrentar os desafios futuros e continuar essa jornada de conhecimento.

REFERÊNCIAS

- AGROBID. **Confira a tendência do mercado de máquinas agrícolas em 2023**. Disponível em: <https://www.agrobid.net/post/confira-as-tend%C3%A2ncias-do-mercado-de-m%C3%A1quinas-agr%C3%A1colas-em-2023>. Acesso em: 15 de out. 2023.
- ALBERTI, B.G; MARINI, V.K. **Levantamento de tecnologias de deposição e condução ativa de sementes aplicadas em semeadoras de precisão**. 6º Congresso Sul-Americano de Agricultura de Precisão e Máquinas Precisas. 6 Ed, 2023. Acesso em: 30 nov. 2023.
- ALONÇO, A. dos S *et al.* **Influência da inclinação transversal e velocidade de operação sobre o desempenho de dosadores pneumáticos com semente de soja**. Revista Engenharia na Agricultura, Viçosa – Minas Gerais, V.22 N.2, p 119-127. Março/ Abril, 2014. Acesso em: 26 out. 2023.
- ALVES, Clovis Tadeu *et al.* **A revolução verde na mesorregião noroeste do RS (1930-1970)**. 2013. Acesso em: 26 out. 2023.
- ANGHINONI, Matheus. **Mecanismos dosadores de sementes e velocidade de deslocamento do conjunto trator-semeadora nos componentes agrônômicos do milho**. 2019. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS. Acesso em: 05 nov. 2023.
- ANZILIERO, Darlei. **Histórico de Semeaduras no Brasil: ênfase em inovação**. Epitaya E-books, v. 1, n. 10, p. 20-33, 2021. Acesso em 23 out. 2023.
- APROSOJA AGÊNCIA DE NOTÍCIAS. **Soja brasileira: história e perspectivas**. Disponível em: <https://aprosojabrasil.com.br/comunicacao/blog/videos/2022/05/04/brazilian-soybean-exports/>. Acesso em: 15 out. 2023.
- BACK, Nelson. **Metodologia de projeto de produtos industriais**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983. Acesso em: 23 nov 2023.
- BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; SILVA, J. C. **Projeto integrado de produto: planejamento, concepção e modelagem**. São Paulo: Manole, 2008. Acesso em: 23 nov 2023.
- BELLÉ, Leocemar Andrade *et al.* **Influência de diferentes velocidades de semeadura no estabelecimento da cultura do milho (*Zea mays* L.)**. Unoesc & Ciência-ACET, v. 9, n. 2, p. 147-154, 2018. Acesso em: 23 out. 2023.
- BERGLAND N. Robert *et al.* **A seed tube for an agricultural seeding machine**. Depositante: Deere. CA 2164457 C. Depósito: 05 dez. 1995. Concessão: 15 jun. 1999. Acesso em 24 out. 2023.
- BERTELLI, Guilherme Augusto *et al.* **Desempenho da plantabilidade de semeadoras pneumática na implantação da cultura da soja no cerrado piuiense-Brasil**. Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science/Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias, v. 9, n. 1, 2016. Acesso em: 05 nov. 2023.

BRANDELERO, Evandro Martin *et al.* **Seeder performance under different speeds and its relation to soybean cultivars yield.** Journal of Agronomy, v. 14, n. 3, p. 139-145, 2015. Acesso em: 03 nov. 2023.

CARPES, D. P. **Distribuição longitudinal de sementes de milho e soja em função do tubo condutor, mecanismo dosador e densidade de semeadura.** 2014. Acesso em 25 out. 2023.

CARPES, D. P *et al.* **Efeito de diferentes tubos condutores na distribuição longitudinal de sementes de milho.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 21, n. 9, p. 657-662, 2017. Acesso em: 05 nov. 2023.

CASÃO JUNIOR, R.; SIQUEIRA, R. **Máquinas para manejo de vegetações e semeadura em plantio direto.** p. 85-126, 2006. Acesso em: 04 nov. 2023.

CHRISTIANSON, L.L.; ROHRBACH, R.P. **Design in agricultural engineering.** St. Joseph: ASABE, 1986. 310 p. Acesso em: 04 nov. 2023.

COELHO, J.L. **Ensaio e certificação de máquinas para semeadura.** In: MIALHE, L.G. (Ed.). Máquinas agrícolas: ensaios e certificações Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1996. p. 551-566. Acesso em: 03 nov. 2023.

COLOMBI, Tino *et al.* **Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth—A vicious circle.** Science of the Total Environment, v. 626, p. 1026-1035, 2018. Acesso em: 22 out. 2023.

CONTE, Osmar *et al.* **Demanda de tração, mobilização de solo na linha de semeadura e rendimento da soja, em plantio direto.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 44, p. 1254-1261, 2009. Acesso em: 03 nov. 2023.

CONTE, Osmar. **Máquinas para adubação e semeadura (Plantabilidade).** 2017. Embrapa Soja. Acesso em: 22 out. 2023.

COPETTI, E. **Plantadoras: culpa de quem?.** Cultivar Máquinas, v.3, n.18, p.14-17,2003. Acesso em: 23 out. 2023.

DEERE & COMPANY, Jay Harold Olson. **Tubo de semear e dosador de sementes.** PI 8600790. Revista Propriedade Industrial. Rio de Janeiro, n. 837, 40 p.1986. Acesso em 04 nov. 2023.

DELAFOSSÉ, R. M. **Máquinas sembradoras de grano grueso.** Santiago: Oficina Regional de La FAO para America Latina y el Caribe, 1986, 48 p. Acesso em 05 nov. 2023.

DONADON, Gianfranco; BOT, Luigi Giovani; MIOLO, Bruno. **Sowing element for precision pneumatic seed drills.** Depositante: Maschio Gaspardo S.P.A. WO 2017182998 A1. Depósito: 22 abr. 2016. Concessão: 26 out. 2017. Acesso em 24 out. 2023.

EMBRAPA. **Mapas de solo do Brasil.** 2011 Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/920267/1/MapadesolosdoBrasilLegendaatualizada2011.pdf>. Acesso em: 24 out. 2023.

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil 2014.** 2013 Londrina, PR, Brasil. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/95489/1/SP-16-online.pdf> Acesso em: 25 out. 2023.

EMBRAPA. **SOJA.** 2020 Rio de Janeiro. Disponível em: <https://mais500p500r.sct.embrapa.br/view/arquivoPDF.php?publicacaoId=90000041>. Acesso em: 05 nov. 2023.

EQUIPE TÉCNICA – Frente Parlamentar da Agropecuária. **Importância da Soja para o Brasil.** 2021. Disponível em: <https://fpagropecuaria.org.br/2021/10/18/importancia-da-soja-para-o-brasil/?pdf=34558>. Acesso em: 15 out. 2023.

ERHARD, Manfred. **Landwirtschaftliche verteilmaschine mit fahrgeschwindigkeits- und/oder saatgutsorten-abhängig veränderbarer druckluftströmungsgeschwindigkeit.** Depositante: Horsch Maschinen. WO 2021069599 A1. Depósito: 08 out. 2020. Concessão: 15 abr. 2021. Acesso em 24 out. 2023.

FARIA, Gabriel. LANDGRAF, Lebna. **Qualidade da semente e cuidados no plantio são decisivos no resultado da lavoura de soja.** 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/70869873/qualidade-da-semente-e-cuidados-no-plantio-sao-decisivos-no-resultado-da-lavoura-de-soja#:~:text=De%20acordo%20com%20os%20palestrantes,de%20sementes%20de%20alta%20qualidade>. Acesso em: 27 out. 2023.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DO SISTEMA PLANTIO DIRETO. **Evolução da área sob plantio direto no Brasil 1973 a 2018.** 2021. Disponível em: <https://febrapdp.org.br/download/14588evolucao-pd-no-bbasil-2021-jpg.jpg>. Acesso em: 03 set. 2023.

FISCHER, Rogério. **Herbert Bartz: um louco pela agricultura e pela sustentabilidade.** 2018. Disponível em: <https://www.plantiodireto.com.br/storage/files/132/1.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2023.

FONSECA, Antonio Jorge Hernandez. **Sistematização do processo de obtenção das especificações de projeto de produtos industriais e sua implementação computacional.** 2000. Acesso em: 01 nov. 2023.

FREITAS MÁQUINAS. **Distribuidor pneumático vSet.** Disponível em: <https://freitasmaquinas.com.br/produtos/distribuidor-pneumatico-vset/>. Acesso em: 10 nov. 2023.

FRANCETTO, Tiago R. *et al.* **Comportamento operacional de associações entre sulcadores e discos de corte para sistema de semeadura direta.** Engenharia Agrícola, v. 35, p. 542-554, 2015. Acesso em: 03 nov. 2023.

FRANCETTO, Tiago R. *et al.* **Desempenho de tubos condutores de sementes.** Engenharia Agrícola, 2014. Disponível em: <https://tiagofrancetto.blogspot.com/2014/04/desempenho-de-tubos-condutores-de.html>. Acesso em: 03 nov. 2023.

GARNER, Elijah B *et al.* **Seed meter for a seed machine.** Depositante: Deere & Company. BR 112013024397 – 0 B1. Depósito: 23 mar. 2012. Concessão: 26 fev. 2019. Acesso em: 24 out. 2023.

GIRARDELLO, Vitor Caduro *et al.* **Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 38, p. 1234-1244, 2014. Acesso em: 23 out. 2023.

GOULART, Augusto César Pereira. **O Sistema Plantio Direto e as doenças de plantas.** Infobibos. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/50002/1/13.pdf>. Acesso em: 18 out. 2023.

GRÜN, Eduarda *et al.* **Aumento da velocidade de semeadura altera a distribuição de plantas de canola.** Vivências, v. 17, n. 33, p. 243-253, 2021. Acesso em: 01 nov. 2023.

PEREIRA, Julio Cesar. Grupo de plantio direto GPD. 2023. Unesp Botucatu, SP – Brasil. Acesso em: 03 nov. 2023.

HENNING, Ademir A., *et al.* **Manejo do solo.** Embrapa Soja. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/producao/manejo-do-solo>. Acesso em: 10 out. 2023.

HORABIK, Józef *et al.* **Determination of the restitution coefficient of seeds and coefficients of visco-elastic Hertz contact models for DEM simulations.** Biosystems Engineering, v. 161, p. 106-119, 2017. Acesso em: 28 nov. 2023.

HÖRBE, Tiago de Andrade Neves; GRAVE, Fernando Luis. **CCGL Pesquisa e Tecnologia.** Cruz Alta – RS, 2021. Acesso em: 03 set. 2023.

JASPER, R., *et al.* **Distribuição longitudinal e germinação de sementes de milho com emprego de tratamento fitossanitário e grafite.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 292-299, 2006. Acesso em: 13 set. 2023.

JASPER, R, *et al.* **Velocidade de semeadura da soja.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 31, n.1, p. 102-110, jan./fev. 2011. Acesso em: 20 nov. 2023.

JING, Huirong *et al.* **Development and performance evaluation of an electro-hydraulic downforce control system for planter row unit.** Computers and Electronics in Agriculture, v. 172, p. 105073, 2020. Acesso em: 28 out. 2023.

JOHN F, Stufflebeanm *et al.* **Seed tube for seed metering apparatus.** Depositante: Case Corporation. US 6332413 B1. Depósito: 15 abr. 1998. Concessão: 25 dez. 2001. Acesso em 24 out. 2023.

KOLCHINSKI, Eliane Maria; SCHUCH, Luis Osmar Braga; PESKE, Silmar Teichert. **Vigor de sementes e competição intra-específica em soja.** Ciência Rural, v. 35, p. 1248-1256, 2005. Acesso em: 23 out. 2023.

KRZYŻANOWSKI, Francisco Carlos *et al.* **A semente de soja como tecnologia e base para altas produtividades: série sementes.** 2008. Londrina, PR, Brasil. Acesso em: 06 nov. 2023.

KURACHI, S.A.H. *et al.* **Avaliação tecnológica de semeadoras e/ou adubadoras: tratamento de dados de ensaios e regularidade de distribuição longitudinal de sementes.** Bragantia, Campinas, v.48, n.2, p.249-262, 1989. Acesso em 25 out. 2023.

LAS. Laboratório de Análise de Sementes. **Vigor em Sementes.** 2020. Santa Maria, RS, Brasil. Disponível em: <https://www.ufsm.br/laboratorios/sementes/vigor-em-sementes-2>. Acesso em: 06 nov. 2023.

LAKATOS, Eva M. **Fundamentos de Metodologia Científica.** 9 Ed. Grupo GEN, 2021. Acesso em: 20 nov. 2023.

MACHADO, Antônio Lilles Tavares *et al.* **Máquinas para preparo de solo, semeadura, adubação e tratamentos culturais.** 2 ed. Pelotas: Editora Gráfica Universitária Pelotas, 2005. 253p. Acesso em: 05 nov. 2023.

MARINI, Vinicius Kaster. **Fatores de influência e funções técnicas no projeto de máquinas agrícolas: uma contribuição teórica.** 2007. Acesso em: 20 out. 2023.

MARTIN, Thomas Newton *et al.* **Tecnologias Aplicadas para o Manejo Rentável e Eficiente da Cultura da Soja.** 2022. Santa Maria – RS, Brasil. Editora GR. Acesso em: 15 out. 2023.

MAZURANA, Michael *et al.* **Propriedades físicas do solo e crescimento de raízes de milho em um Argissolo Vermelho sob tráfego controlado de máquinas.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 37, p. 1185-1195, 2013. Acesso em: 20 out. 2023.

MENDES, Luis, Gustavo. **Cálculo de semeadura da soja: 5 passos para a população de plantas ideal no seu sistema.** 2023. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br/calculo-de-semeadurasoja/#:~:text=O%20n%C3%BAmero%20de%20plantas%20por,seriam%2010%20plantas%2Fmetro%20linear>. Acesso em: 27 out. 2023.

MERCANTE, Erivelto *et al.* **Demanda energética e distribuição de sementes de milho em função da velocidade de duas semeadoras.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 9, p. 424-428, 2005. Acesso em: 01 nov. 2023.

MIALHE, L.G. **Máquinas agrícolas para plantio.** 1. ed. Campinas: Millenium Editora, p.623. 2012. Acesso em: 05 nov. 2023.

MODOLO, Alcir José *et al.* **Demanda energética solicitada por uma semeadora-adubadora de precisão com diferentes unidades de semeadura.** 2005. Maringá, MG, Brasil. Acesso em: 04 nov. 2023.

MOLETA, Igor *et al.* **Desempenho de semeadora-adubadora pneumática e mecânica em diferentes velocidades na soja.** Research, Society and Development. Acesso em: 04 nov. 2023.

NEGI, S.C *et al.* **Crop performance as affected by traffic and tillage in a clay soil.** Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, v.23, p.1364-1368, 1980. Acesso em: 25 out. 2023.

NETO, José B. França *et al.* **A importância da utilização de sementes de soja de alta qualidade.** Embrapa Soja, Londrina, PR, 2022. Acesso em: 25 out. 2023.

NOER, Miguel Humberto. **Vacuum seed dosing and transporting system applied to a seeder.** Depositante: Marcio Luiz Neuvald Silva. BR 112021001297 – 4 A2. Depósito: 21 jun. 2018. Concessão: 27 abr. 2021. Acesso em 25 out. 2023.

PACHECO, E. P *et al.* **Avaliação de uma semeadora-adubadora de precisão.** Revista da Pesquisa Agropecuária-PAB. Brasília, v. 31, n. 03, p. 209-214. 1996. Acesso em: 23 out. 2023.

PAHL, Gerhard. **Projeto na Engenharia.** Blucher, 2005. Acesso em: 23 nov. 2023.

PIRKENSEER, Manfred. **Dosing device.** Depositante: Horsch Maschinen. EP 3357319 B1. Depósito: 26 jan. 2016. Concessão: 13 nov. 2019. Acesso em 24 out.2023.

PORTELLA, J. A. **Mecanismos dosadores de sementes e de fertilizantes em máquinas agrícolas.** Doc. Cent. Nac. Pesquisa. Trigo/EMBRAPA, n. 41, p. 1-40, 1997. Acesso em: 23 out. 2023.

PORTELLA, J. A. **Plantio de precisão: o desafio para o século XXI.** Embrapa Trigo, 1999. Acesso em: 23 out. 2023.

RADTKE, Ian; SWANSON, Todd. **Seed delivery apparatus, systems, and methods.** Depositante: Precision Planting. US 10765057 B2. Depósito: 14 jan. 2018. Concessão: 08 sep. 2020. Acesso em: 24 out. 2023.

RAMBO, Lisandro *et al.* **Rendimento de grãos da soja em função do arranjo de plantas.** Ciência Rural, v. 33, p. 405-411, 2003. Acesso em: 01 nov. 2023.

REINERT, D. J. **Soil structural form and stability induced by tillage in a typic hapludalf.** 1990. 128f. Tese (Doutorado) - Michigan State University, Michigan, 1990. Acesso em: 25 out. 2023.

REIS, A.V.; ALONÇO, A. dos S. **Comparativo sobre a precisão funcional de vários mecanismos dosadores estudados no Brasil entre os anos de 1989 e 2000.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001. Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001. 1 CD-ROM. Acesso em 23 out. 2023.

REIS, Ângelo Vieira dos; FORCELLINI, Fernando Antônio. **Functional analysis in the evaluation of four concepts of planters.** Ciência Rural, v. 32, p. 969-975, 2002. Acesso em 03 set. 2023.

REIS, Ângelo Vieira dos. **Desenvolvimento de concepções para a dosagem e deposição de precisão para sementes miúdas.** 2003. 156 f. 2003. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Acesso em 03 set. 2023.

REIS, Elton Fialho dos *et al.* **Densidade do solo no ambiente solo-semente e velocidade de emergência em sistema de semeadura de milho.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 30, p. 777-785, 2006. Acesso em: 04 nov. 2023.

REVISTA CULTIVAR. **Sistemas de distribuição de fertilizantes em semeadoras.** 2016. Pelotas, RS, Brasil. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/artigos/sistemas-de-distribuicao-de-fertilizantes-em-semeadoras>. Acesso em: 04 nov. 2023.

REVISTA CULTIVAR. **Influência da velocidade na semeadura.** 2020 Pelotas, RS, Brasil. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/artigos/influencia-da-velocidade-na-semeadura#:~:text=A%20velocidade%20na%20opera%C3%A7%C3%A3o%20de,como%20i%20deais%20para%20a%20opera%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 04 nov. 2023.

REVISTA CULTIVAR. **Test Drive Semeadora Maestro Evolution 36.50 da Horsch.** 2021. Pelotas, RS, Brasil. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/artigos/test-drive-semeadora-maestro-evolution-36-50-da-horsch>. Acesso em: 04 nov. 2023.

ROCHA, Francisco Eduardo De Castro *et al.* **Avaliação de três mecanismos de distribuição de sementes.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 33, n. 3, p. 331-337, 1998. Acesso em: 04 nov. 2023.

RODRIGUES, Gilberto. **Velocidade ao solo na semeadura de grãos.** 2022. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/velocidade-ao-solo-na-semeadura-de-gr%C3%A3os-gilberto-rodrigues/?originalSubdomain=pt>. Acesso em: 24 out. 2023.

ROMANO, L. N. **Modelo de Referência para o Processo de Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas.** Tese de Doutorado—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. Acesso em 03 set. 2023.

SANTI, A. L. *et al.* **Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul.** CESPOL, Santa Maria, RS, Brasil. 2016. Acesso em: 30 out. 2023.

SANTOS, H.G. *et al.* **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p. (Embrapa Solos. Documentos, 130). Acesso em: 27 out. 2023.

SAUDER, Derek, A; PLATTNER, Chad, E; WIEGAND, Brand, A. **Wear resistant seed tube for agricultural planter.** Depositante: Precision Planting, INC. WO 2007024624 A2. Depósito: 19 ago. 2005. Concessão: 01 mar. 2007. Acesso em: 25 out. 2023.

SHARDA, Ajay *et al.* **Planter downforce technology for uniform seeding depth.** Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service Precision, MF3331, v. 7, 2017. Acesso em: 28 out. 2023.

SILVA, José Geraldo da; KLUTHCOUSKI, João; SILVEIRA, Pedro Marques da. **Desempenho de uma semeadora-adubadora no estabelecimento e na produtividade da cultura do milho sob plantio direto.** Scientia Agrícola, v. 57, p. 7-12, 2000. Acesso em 23 out. 2023.

SILVA, Paulo Roberto Arbex. **Treinamento de Plantabilidade.** UNESP/ Botucatu. 2022. Acesso em: 15 set. 2023.

SILVA, Ríbamar. **Disponibilidade de Nutrientes**. 2005. Disponível em: <https://www.ufac.br/site/ufac/prograd/educacao-tutorial/grupos-pet/pet-agronomia-1/apoio-didatico/quimica-e-ferlidade-do-solo/unidade-4-disponibilidade-de-nutrientes>. Acesso em: 29 out. 2023.

SILVA, Vandelei Rodrigues da. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 160F. Tese (Doutorado Em Agronomia – Biodinâmica Do Solo) - Universidade Federal De Santa Maria, Santa Maria, 2003. Acesso em: 20 out. 2023.

STEFANELLO, Giusepe *et al.* **Estrutura funcional de uma semeadora de tração humana**. Ciência Rural, v. 44, p. 1583-1588, 2014. Acesso em: 03 set. 2023.

TIM, Schaefer; RADTKE, Ian;. Seed planting apparatus, systems and methods. Depositante: Precision Planting. US 9861025 B2. Depósito: 12 mai. 2017. Concessão: 09 jan. 2018. Acesso em: 24 out. 2023.

WILHELMI, Matthew *et al.* **Planter with high speed seed delivery apparatus**. Depositante: Kinze Manufacturing. BR 112020006264 – 2 A2. Depósito: 28 set. 2018. Concessão: 06 out. 2020. Acesso em 24 out. 2023.