



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Faculdade de Engenharia Química
Programa de Pós-graduação em Engenharia de
Alimentos



JONAS ROGÉRIO DE MELO SOUSA

**HOMOGENEIDADE DA MISTURA NA FABRICAÇÃO DE PREMIX PARA
ALIMENTAÇÃO ANIMAL: EFEITO DO VOLUME DE OCUPAÇÃO E TIPO DE
MISTURADOR**

Patos de Minas - MG

2024

JONAS ROGÉRIO DE MELO SOUSA

HOMOGENEIDADE DA MISTURA NA FABRICAÇÃO DE PREMIX PARA ALIMENTAÇÃO ANIMAL: EFEITO DO VOLUME DE OCUPAÇÃO E TIPO DE MISTURADOR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Uberlândia – Campus Patos de Minas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos, área de concentração de Desenvolvimento de Processos e Produtos.

Orientador(a): Michelle Andriati Sentanin,

Coorientador(a): Filipe Zanferari, Líbia Diniz Santos.

Patos de Minas - MG

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S725h
2024

Sousa, Jonas Rogério de Melo, 1993-
Homogeneidade da mistura na fabricação de premix para alimentação animal [recurso eletrônico]: efeito do volume de ocupação e tipo de misturador / Jonas Rogério de Melo Sousa. - 2024.

Orientadora: Michelle Andriati Sentanin.

Coorientadores: Filipe Zanferari, Líbia Santos Diniz.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.5503>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Tecnologia de alimentos. 2. Nutrição animal. I. Sentanin, Michelle Andriati, 1982-, (Orient.). II. Zanferari, Filipe, 1989-, (Coorient.). III. Diniz, Líbia Santos, 1978-, (Coorient.). VI. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos. IV. Título.

CDU: 664

Rejâne Maria da Silva
Bibliotecária-Documentalista – CRB6/1925

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos - Patos de Minas

Rua Vereador Chico Filgueira, 33, 3º andar, Sala 21 - Bairro Caiçaras, Patos de Minas-MG, CEP 38702-178
Telefone: (34) 3823-3714 - www.ppgea.feq.ufu.br - coordppgea@feq.ufu.br

**ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO**

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia de Alimentos				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico n. 8/2024 - PPGEA				
Data:	Quatro de junho de dois mil e vinte e quatro	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16:30
Matrícula do Discente:	42122EAL004				
Nome do Discente:	Jonas Rogério de Mélo Sousa				
Título do Trabalho:	Homogeneidade da mistura na fabricação de premix para nutrição animal: efeito do volume de enchimento e tipo de misturador				
Área de concentração:	Engenharia de Alimentos				
Linha de pesquisa:	Desenvolvimento de Processos e Produtos				

Reúne-se por webconferência (Microsoft Teams) a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos, assim composta: Michelle Andriati Sentanin (Presidente/Orientadora), Rubens Gedraite (Membro UFU), e Felipe Norberto Alves Ferreira (Membro Externo).

Iniciando os trabalhos, o(a) presidente da mesa apresentou a Comissão Examinadora e o(a) discente, agradeceu a participação do público, e concedeu ao(à) discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do(a) mesmo(a) se deu em conformidade às normas do Programa.

A seguir, a senhora presidente concedeu a palavra aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) discente. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos legais, a Banca Examinadora, em sessão reservada, atribuiu o conceito final, considerando o(a) discente:

Aprovado.

Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico integra os requisitos à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme será assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Michelle Andriati Sentanin, Professor(a) do Magistério Superior**, em 04/06/2024, às 16:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rubens Gedraite, Professor(a) do Magistério Superior**, em 04/06/2024, às 16:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Norberto Alves Ferreira, Usuário Externo**, em 04/06/2024, às 16:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5427087** e o código CRC **BBA49A26**.

Referência: Processo nº 23117.035415/2024-78

SEI nº 5427087

A minha mãe Maria Teresa (Maytê), à minha família Júlia e Cleiton, aos meus avôs, meus irmãos, amigos e familiares que sempre me incentivaram e torceram muito por todas minhas vitórias.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus que em sua generosidade permitiu que tudo isso pudesse acontecer ao longo da minha vida, não somente nestes anos na UFU, mas em todos os momentos de minha existência, provando muitas vezes que meus sonhos são possíveis.

A minha orientadora Prof^a Dr^a Michelle Andriati Sentanin e meus coorientadores Dr. Filipe Zanferari e Prof^a Dr^a Líbia Dinis Santos.

A Universidade Federal de Uberlândia que me recebeu para fazer essa especialização.

A todos os funcionários da empresa “AniFeed” (cujo nome verdadeiro foi alterado para proteger sua identidade), especialmente a Ricardo, Maurício e Traldi, que me deram a oportunidade de trabalhar nesse projeto, e à equipe que me ajudou a conduzir o experimento, em especial Adriana, Aline D., Aline T., Ana Paula, Antônio, Carolina, Cynthia e Marcos, além da equipe de analistas do laboratório e de operadores de produção.

À minha família, em especial aos meus avôs maternos (Vô Bandeira e Vó Beth) e aos avôs paternos (Vô Toninho e Vó Rosinha *in memoriam*) aos quais sou muito agradecido por nunca medirem esforços para que isso pudesse acontecer. Nossas conquistas atuais só são possíveis devido à dedicação, ao trabalho e ao esforço de vocês.

A minha mãe Maria Teresa (Maytê), e aos meus irmãos. Giovanna, Gabriel e Matheus pelo amor e incentivo de sempre e não posso, também, deixar de agradecer a minha madrastra Rose. Obrigado por vocês existirem e serem minha família. Por mais que eu procure palavras, elas não seriam suficientes para definir o meu amor por todos vocês.

E a minha companheira de vida, Júlia Arakaki, pela compressão, apoio, carinho e incentivo em todos os momentos difíceis.

E, finalmente, agradeço a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

Dedico esse trabalho a vocês.

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

Arthur Schopenhauer

RESUMO

A produção animal tem atingido patamares de produtividade consideráveis e boa parte disso se deve à nutrição, a qual representa mais de 70% dos custos de produção. Portanto, o processo de fabricação de produtos para alimentação animal exige elevados níveis de controle, especialmente no que se refere à qualidade das misturas, garantindo que os ingredientes estejam adequadamente dispersos na batelada de alimento produzido, a fim de assegurar o consumo homogêneo de nutrientes pelos animais. Características operacionais, como o volume de ocupação do misturador, assim como o tipo de misturador, podem afetar a homogeneidade da mistura. Ainda, dependendo da formulação, o processo de homogeneização da mistura pode ser mais ou menos desafiador. Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar o impacto do volume de ocupação de dois tipos de misturadores horizontais, sendo um de pás e outro helicoidal, sobre a homogeneidade da mistura de um premix vitamínico-mineral. Foram avaliados os volumes de ocupação de 10%, 30%, 50%, 70% e 90% em relação ao volume útil total de cada misturador. Foi utilizado o coeficiente de variação (CV) como método de avaliação da homogeneidade da mistura, utilizando como indicadores cálcio, cobre, ferro, magnésio, manganês, sódio, enxofre, selênio e zinco, além do indicador composto pela média de todos os elementos minerais analisados. O critério de decisão foi obter um CV inferior a 10%. Todos os volumes testados nos dois misturadores atenderam o critério de decisão, exceto para sódio no misturador helicoidal com 10% de volume de ocupação, onde o CV foi de 10,6%. Para o misturador de pás não foi observada diferença entre os volumes testados pela análise de regressão ($P > 0,05$). Para o misturador helicoidal foi observado efeito quadrático ($P < 0,05$) para cobre, ferro, manganês, enxofre e indicador composto; e efeito linear ($P < 0,05$) para sódio, selênio e zinco; sendo os maiores resultados de CV obtidos com 10% volume de ocupação para todos os indicadores testados. Quando comparados os resultados entre os misturadores, foi observada interação entre tipo de misturador vs. volume de ocupação para manganês e selênio ($P < 0,05$). Para cálcio, cobre e ferro, o CV foi inferior ($P < 0,05$) no misturador helicoidal. Independentemente do tipo de misturador, o volume de ocupação teve efeito quadrático ($P < 0,05$) para zinco e linear ($P < 0,05$) para ferro, sódio e indicador composto. Quando os dados foram analisados por *machine learning*, a árvore decisória relevou que os melhores resultados de CV (inferiores à mediana de 5,425%)

para o indicador composto são obtidos quando o premix é fabricado no misturador helicoidal com um volume de ocupação superior a 20%, com assertividade de 90%.

Palavras-chave: Nutrição animal, homogeneidade da mistura, coeficiente de variação (CV), mistura de pós, misturadores horizontais.

ABSTRACT

Animal production has reached significant levels of productivity, much of which is due to nutrition, which represents more than 70% of production costs. Therefore, the manufacturing process of animal feed products requires high levels of control, especially regarding the quality of the mixtures, ensuring that ingredients are adequately dispersed within the batch of feed produced to ensure homogeneous nutrient consumption by the animals. Operational characteristics, such as the mixer's fill level and the type of mixer, can affect the homogeneity of the mixture. Additionally, depending on the formulation, the mixing process can be more or less challenging. Thus, this study aimed to evaluate the impact of the fill level in two types of horizontal mixers—a paddle mixer and a ribbon mixer—on the homogeneity of a vitamin-mineral premix. The fill levels of 10%, 30%, 50%, 70%, and 90% were evaluated in relation to the total usable volume of each mixer. The coefficient of variation (CV) was used as a method to assess mixture homogeneity, using calcium, copper, iron, magnesium, manganese, sodium, sulfur, selenium, and zinc as indicators, along with a composite indicator based on the average of all the mineral elements analyzed. The decision criterion was to obtain a CV below 10%. All tested fill levels in both mixers met the decision criterion, except for sodium in the ribbon mixer at 10% fill level, where the CV was 10.6%. No differences were observed between the tested fill levels in the paddle mixer by regression analysis ($P > 0.05$). In the ribbon mixer, a quadratic effect was observed ($P < 0.05$) for copper, iron, manganese, sulfur, and the composite indicator, and a linear effect ($P < 0.05$) for sodium, selenium, and zinc, with the highest CV results obtained at 10% fill level for all tested indicators. When comparing the results between mixers, an interaction was observed between mixer type and fill level for manganese and selenium ($P < 0.05$). For calcium, copper, and iron, the CV was lower ($P < 0.05$) in the ribbon mixer. Regardless of the mixer type, the fill level had a quadratic effect ($P < 0.05$) on zinc and a linear effect ($P < 0.05$) on iron, sodium, and the composite indicator. When the data were analyzed using machine learning, the decision tree revealed that the best CV results (below the median of 5.425%) for the composite indicator are obtained when the premix is manufactured in the ribbon mixer with a fill level greater than 20%, with 90% accuracy.

Keywords: Animal nutrition, coefficient of variation (CV), mixture homogeneity, powder blending, horizontal mixers.

SUMÁRIO

RESUMO	IV
ABSTRACT	VI
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE ABREVIATURAS	XI
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1. FABRICAÇÃO DE MISTURAS PARA ALIMENTAÇÃO ANIMAL	3
2.1.1. TIPOS DE MISTURADORES	6
2.1.1.1. VOLUME DE OCUPAÇÃO DOS MISTURADORES.....	11
2.1.2. AMOSTRAGEM DA MISTURA.....	13
2.2. CARACTERÍSTICAS DOS INGREDIENTES E HOMOGENEIDADE DE MISTURAS	15
2.2.1. DENSIDADE	15
2.2.2. TAMANHO DAS PARTÍCULAS	17
2.2.3. FORMA FÍSICA DAS PARTÍCULAS	19
2.3. AVALIAÇÃO DA HOMOGENEIDADE DE MISTURAS	20
2.3.1. COEFICIENTE DE VARIAÇÃO	21
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	22
3.1. CARACTERÍSTICAS DOS MISTURADORES E LINHAS DE PRODUÇÃO	22
3.2. DEFINIÇÃO DA FORMULAÇÃO DO PRODUTO.....	24
3.3. VOLUME DE OCUPAÇÃO DOS MISTURADORES	26
3.4. PROCEDIMENTO DE MISTURA	26
3.5. PROCEDIMENTO DE AMOSTRAGEM	27

3.6. ANÁLISES LABORATORIAIS.....	29
3.6.1. DENSIDADE.....	29
3.6.2. TAMANHO DE PARTÍCULA	29
3.6.3. MICROSCOPIA	31
3.6.4. ANÁLISE DE MINERAIS	31
3.7. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL, ANÁLISES ESTATÍSTICAS E MACHINE LEARNING.....	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS INGREDIENTES E DA FORMULAÇÃO....	34
4.2. CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO.....	40
4.3. VOLUME MÍNIMO DE OCUPAÇÃO DO MISTURADOR COM BASE NA HOMOGENEIDADE DA MISTURA.....	44
4.4. AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA HOMOGENEIDADE DA MISTURA ENTRE MISTURADOR HELICOIDAL E DE PÁS.....	48
4.5. RESPOSTAS A PARTIR DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA A MÁXIMA HOMOGENEIDADE DA MISTURA.....	53
4.6. O COMPORTAMENTO DO CV EM FUNÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS INGREDIENTES DA MISTURA.....	56
5. CONCLUSÕES	60
6. SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO.....	61
7. REFERÊNCIAS	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Volume útil para misturadores em relação ao volume total.....	11
Tabela 2: Relação entre o tamanho da partícula e o número de partículas	19
Tabela 3: Composição de ingredientes do premix mineral vitamínico utilizado no estudo.....	25
Tabela 4: Volumes de ocupação teórico dos misturadores utilizados na fabricação do premix.....	26
Tabela 5: Amostragem no pós-mistura da linha do misturador de pás.	28
Tabela 6: Caracterização física (MEA, DGM e DPG) dos ingredientes que compuseram a formulação do premix utilizado no estudo	34
Tabela 7: Concentração teórica (mg/kg) dos minerais utilizados como indicadores para avaliação da homogeneidade da mistura do premix.....	38
Tabela 8: Percentual de contribuição de cada ingrediente na concentração dos indicadores minerais analisados no premix.	38
Tabela 9: Coeficientes de variação (%) da mistura do premix mineral vitamínico produzido em misturador de pás.....	44
Tabela 10: Coeficientes de variação (%) da mistura do premix mineral vitamínico produzido em misturador helicoidal.	45
Tabela 11: Modelos de regressão polinomial para coeficiente de variação da mistura (y) em função do volume de ocupação (x) do misturador de helicoidal.	45
Tabela 12: Significância de valores da ANOVA, considerando os fatores tipo de misturador, volume de ocupação e a interação entre eles.....	49
Tabela 13: Rankings dos indicadores utilizados no estudo a partir dos resultados de CV e das características físicas dos ingredientes e do produto.....	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxo de produção	4
Figura 2: Moinho de rolo.....	5
Figura 3: Moinho de martelo.....	5
Figura 4: Misturador horizontal helicoidal.....	8
Figura 5: Misturador horizontal de pá	8
Figura 6: Misturador vertical.	9
Figura 7: Misturador V	10
Figura 8: Misturador Bin.....	11
Figura 9: Desempenho da sonda ladrão.....	14
Figura 10: (a) Densidade aparente aerada e (b) densidade aparente compactada ...	16
Figura 11: Vibrador de peneiras.	18
Figura 12: Fluxograma (a) UPR e (b) UPS	23
Figura 13: Calador de graneleiro de inox.....	28
Figura 14: Digestor de micro-ondas.....	32
Figura 15: Amostra em balão volumétrico após a digestão	32
Figura 16: Equipamento ICP - Espectrometria de massa por plasma	33
Figura 17: Imagens de microscopia: (a) Casca de arroz, (b) Calcário calcítico e (c) Caulim	36
Figura 18: Imagens de microscopia: (d) Sulfato ferroso (e) Pré-mistura de vitaminas*, (f) Óxido de zinco, (g) Sulfato de cobre, (h) Óxido de manganês, (i) Diluição de iodato de cálcio e (j) Selenito de sódio	37
Figura 19: Distribuição granulométrica de partículas do premix em comparação com a distribuição das partículas dos ingredientes fonte dos indicadores e veículos.....	41
Figura 20: Massa específica (kg/m^3) dos ingredientes fonte dos indicadores e veículos em comparação com o premix.....	42
Figura 21: Imagem de microscopia do premix utilizado no estudo	43
Figura 27: Árvore decisória dos fatores que influenciam o CV da mistura, baseado no indicador composto, sendo misturador helicoidal e misturador de pás.....	54
Figura 28: Árvore decisória para determinação de qual volume e unidade produtiva a ser usada para obter os 20% melhores resultado.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS

BPF – Boas práticas de fabricação

CV – Coeficiente de variação

DGM – Diâmetro geométrico médio

F&D – Formulação e desenvolvimento

FAO – *Food and Agriculture Organization*

ICP – Espectrometria de massa por plasma

IFIF – *International Feed Industry Federation*

MAPA – Ministério da Agricultura e Pecuária

MEA – Massa específica

MP – Matéria-prima

NIRS – Espectrometria de infravermelho próximo

PIB – Produto interno bruto

SINDIRAÇÕES – Sindicato Nacional da Indústria de Alimentação Animal

UPR – Unidade de produção de rações

UPS – Unidade de produção de suplementos

VU – Volume útil

1. INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo, os produtores rurais brasileiros têm demonstrado uma crescente competência na produção de alimentos, como evidenciado pelos elevados índices de produtividade do setor, que representa um terço do Produto Interno Bruto (PIB) (FELL; BECCHI, 2017). Conforme relata a *Food and Agriculture Organization* (FAO) (2021), é esperado um crescimento populacional de cerca de 33% até 2050, o que implica na necessidade de aumento e otimização da cadeia de produção e distribuição de alimentos. Portanto, torna-se imprescindível que os países trabalhem incessantemente na otimização da produção de alimentos destinados tanto à alimentação humana quanto animal. Isso deve levar em consideração não apenas a diminuição da população rural, o que implica em menos mão de obra para atender a maiores demandas, mas também as adversidades climáticas que interferem diretamente nessa cadeia produtiva.

A Federação Internacional da Indústria de Alimentação (*International Feed Industry Federation – IFIF*) estimou uma produção anual mundial de ração animal de 1 bilhão de toneladas em 2021, o que corresponde a um faturamento em torno de US\$ 400 bilhões. De acordo com a Organização, os maiores produtores de ração animal são China (20%), Estados Unidos (18%), União Europeia (13%) e Brasil (7%). Apesar de ser o 4º maior produtor, o Brasil é o país que apresenta o maior crescimento no setor, superando os atuais líderes de mercado (IFIF, 2021).

De acordo com os dados da pesquisa “Perspectivas do Setor Agroalimentar da Altech (2023)”, o Brasil encerrou 2022 com uma produção de nutrição animal de 81,948 milhões de toneladas, representando um aumento de 0,87% em relação ao ano anterior, o que mantém o país na liderança na América Latina. Esse resultado positivo contrasta com a queda global de 0,42% confirmada em 2022, que totalizou 1,266 bilhão de toneladas. O Sindicato Nacional da Indústria de Alimentação Animal (2023) destacou que, em 2022, os principais aumentos de produção foram observados nas áreas de suinocultura (aumento de 4,5%), bovinos de corte (2%) e na alimentação de cães e gatos (aumento de 7%) (ZANI, 2023).

Na alimentação animal, a ração é a principal forma de nutrição para as espécies e é a mais produzida no Brasil. De acordo com a EMBRAPA (1996), ração é a

quantidade total de alimento que um animal ingere em 24 horas, e ração balanceada é aquela que contém nutrientes em quantidade e proporções adequadas para atender às exigências orgânicas dos animais. A composição da ração inclui diversos ingredientes, que se dividem em macroconstituintes, como milho, farelo de soja, farelo de trigo, entre outros, e ingredientes de menor inclusão, como fontes de minerais, vitaminas e aditivos. Para garantir a adequada distribuição desses ingredientes na ração, é recomendado que sejam pré-misturados durante a fabricação. Essas pré-misturas são conhecidas como núcleos e premixes. Segundo a Instrução Normativa N° 15 de maio de 2009 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), o núcleo é a pré-mistura composta por aditivos e macrominerais contendo ou não veículo ou excipiente, facilitando a dispersão em grandes misturas, que não podem ser fornecidas diretamente aos animais. Já o premix é definido como a pré-mistura de aditivos e veículo ou excipiente, que facilita a dispersão em grandes misturas, também não podendo ser fornecido diretamente aos animais (BRASIL, 2009).

Dado que a qualidade da mistura dos ingredientes é crucial para o produto final, uma alimentação adequada e equilibrada está diretamente relacionada ao desempenho dos produtos para alimentação animal. O objetivo de alcançar uma mistura homogênea dos ingredientes é obter um produto ideal, no qual a probabilidade de escolha de um determinado tipo de componente seja a mesma em todas as posições da mistura (SAENSUKJAROENPHON, 2016).

Vários fatores podem afetar a qualidade de uma mistura, portanto é importante estudá-los durante o desenvolvimento e a fabricação de um novo produto. Entre esses fatores estão as propriedades físicas dos pós que determinam a tendência de separação da mistura, como densidade das partículas, forma, tamanho, propriedades de superfície e intensidade de coesão. Além disso, as condições de processo, como os equipamentos e operações, bem como as formulações, como projeto e operação do misturador, combinação de condições operacionais e a composição da mistura, desempenham um papel crucial (MENDEZ; DE CARLI; GARCIA, 2010).

Diante da necessidade de obter misturas ideais e de entender os fatores que interferem nesse processo, o objetivo desse trabalho foi avaliar o impacto do volume de ocupação de dois tipos de misturadores horizontais, sendo um de pás e outro

helicoidal, sobre a homogeneidade da mistura de um premix vitamínico-mineral, utilizado na fabricação de rações na indústria de alimentação animal. Isso será relacionado com as características físicas dos ingredientes e com as características dos misturadores e da linha de produção fabril. Destacam-se como objetivos específicos: i) Definir o volume mínimo de ocupação do vaso do misturador com base na homogeneidade da mistura; ii) Comparar o desempenho de diferentes misturadores (helicoidal e de pás) quanto à homogeneidade da mistura do produto alvo.

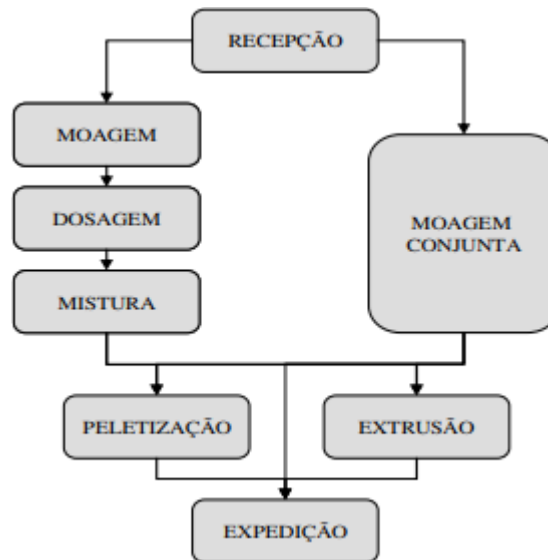
2. REVISÃO DA LITERATURA

A primeira parte deste capítulo apresenta uma revisão sobre o tema proposto, por meio de pesquisa bibliográfica realizada em artigos científicos, dissertações e teses disponíveis nas bases de dados online: Scientific Eletronic Library Online – Scielo (<https://www.scielo.br/>), Science Direct (<https://www.sciencedirect.com/>), Google Acadêmico (<https://scholar.google.com.br/?hl=pt>) e na base de periódicos CAPES, utilizando palavras-chave relacionadas ao tema, como “Feed”, “particle size”, “mixture segregation” e “Powder Flow”. Em alguns momentos se fez necessária a pesquisa de artigos e demais trabalhos especificamente nacionais para abordagem do assunto, portanto foram utilizados os termos traduzidos. Foram considerados os trabalhos publicados com as informações importantes mais recentes disponíveis.

2.1. FABRICAÇÃO DE MISTURAS PARA ALIMENTAÇÃO ANIMAL

Avalia-se que aproximadamente 70% do custo final da criação de animais seja atribuído à alimentação. O fluxo básico de produção de ração (conforme demonstrado na Figura 1) é composto por recepção de matéria-prima (MP), preparação da mesma, processamento e finalização. O início da produção é marcado pela etapa de recepção da matéria-prima, envolvendo seu recebimento e armazenagem, conforme as boas práticas de fabricação (BPF). A etapa de preparação engloba operações como pré-limpeza, secagem e moagem dos grãos, quando aplicável. Por sua vez, o processamento inclui operações de dosagem e mistura, além da peletização/extrusão quando aplicável, seguidas pela etapa de finalização, que abrange operações de ensaque e expedição (REESE; FOLTZ; MORITZ, 2017; TOSO; MORABITO, 2008).

Figura 1: Fluxo de produção.

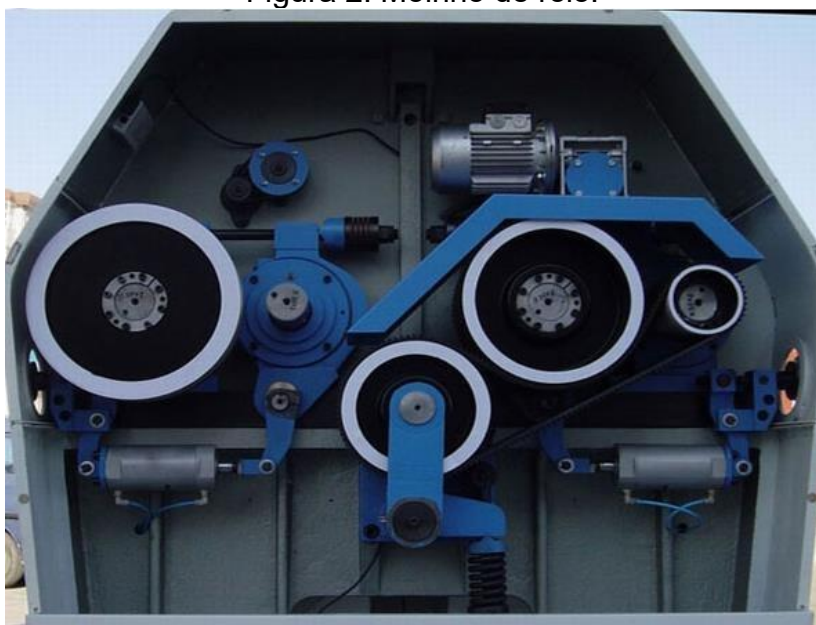


Fonte: Toso e Morabito, 2008.

A moagem, realizada antes da mistura, é uma etapa fundamental no processo de fabricação de ração, pois contribui para diminuir a segregação dos ingredientes, solucionar problemas de mistura e aumentar a área de superfície, o que melhora a taxa de digestão e facilita outros processos, como a extrusão/peletização. Embora o custo da moagem seja considerável, seus benefícios incluem a capacidade de armazenamento e a uniformidade das partículas, a redução da separação durante o transporte de ração a granel, o aumento do grau de gelatinização da fécula durante a peletização e a melhoria da qualidade do pelete (ALMEIDA et al., 2021).

Para reduzir o tamanho das partículas dos ingredientes da ração, os principais métodos de moagem utilizados são os moinhos de rolos (conforme ilustrado na Figura 2) e os moinhos de martelos (conforme ilustrado na Figura 3), que possuem telas de tamanhos variados. A eficiência da moagem está diretamente relacionada à espessura, diâmetro do furo e área aberta da peneira (BEHNKE, 1996; LANCHEROS; ESPINOSA; STEIN, 2020). Os moinhos de rolos consomem menos energia e produzem partículas cúbicas ou retangulares de tamanho mais uniforme em comparação com os moinhos de martelos, que são mais fáceis de operar e geram mais partículas esféricas, embora em maior quantidade (HAFEEZ et al., 2015).

Figura 2: Moinho de rolo.



Fonte: Grain Machinery, n.d.

Figura 3: Moinho de martelo.



Fonte: Lippel, n.d.

Os moinhos de martelo são especialmente adequados para a produção de uma grande quantidade de partículas finas e algumas grossas, sendo amplamente utilizados nos processos de aglomeração em contracorrente. Em um moinho de martelo, a energia necessária para moer um determinado ingrediente varia de acordo com a distribuição granulométrica necessária. Por outro lado, os moinhos de rolos têm a vantagem de produzir partículas mais uniformes, com uma menor porcentagem de finos em comparação com os moinhos de martelo (THOMAS; HENDRIKS; VAN DER POEL, 2018).

A dosagem das matérias-primas é baseada em formulações pré-estabelecidas. Os operadores avaliam as quantidades demandadas das matérias-primas e determinam quais serão dosadas automaticamente e quais serão dosadas manualmente. Normalmente as matérias-primas utilizadas em maior quantidade e que estão armazenadas em silos são dosadas automaticamente pelas balanças dosadoras e liberadas pré-misturadas para se unirem às matérias-primas dosadas manualmente, dando continuidade ao processo. A mistura pode ocorrer em até três fases: mistura seca, adição de líquidos (quando se aplica) e mistura final. Em seguida, a mistura é descarregada no pós-misturador e subsequentemente ensacada (TOSO; MORABITO; CLARK, 2009).

A sequência de adição dos ingredientes no misturador é crucial para uma boa homogeneização, pois os misturadores podem ter pontos onde os ingredientes dosados em menor quantidade se alojam, impedindo a incorporação correta na ração. Esses pontos de acúmulo são mais comuns em misturadores de fita e de pás que estão desgastados. Portanto, a sequência ideal é adicionar primeiramente os macroingredientes ao misturador, como grãos moídos, farelo de soja, caulim e fosfato, entre outros (FEI, 2009). Zinn (1999) recomenda que ao preparar um suplemento seja adicionado primeiro o veículo e outros ingredientes principais de maior inclusão, até atingirem a linha central do eixo do misturador, seguido da pré-mistura e outros ingredientes de menor inclusão e, por último, o restante dos ingredientes principais da formulação. A etapa de mistura é considerada um dos processos mais críticos e essenciais na fabricação de ração, independentemente do produto. Uma falha de operação nesta etapa pode levar à redução da uniformidade da dieta, afetando não apenas o desempenho animal, mas também a conformidade regulatória estabelecida pelos órgãos de agricultura de cada país (BEHNKE, 1996).

2.1.1. TIPOS DE MISTURADORES

A importância da mistura de pós para a economia global é crucial, uma vez que os produtos das indústrias farmacêutica, mineral, agrícola e alimentícia dependem cada vez mais do fluxo granular confiável e da mistura granular ideal (CHO et al., 2012). Uma mistura ideal é aquela em que é possível obter exatamente a mesma composição percentual de cada alíquota retirada da mistura, independentemente da

quantidade amostrada. No entanto, a probabilidade de se obter uniformidade em misturadores industriais é extremamente baixa (POUX et al., 1990).

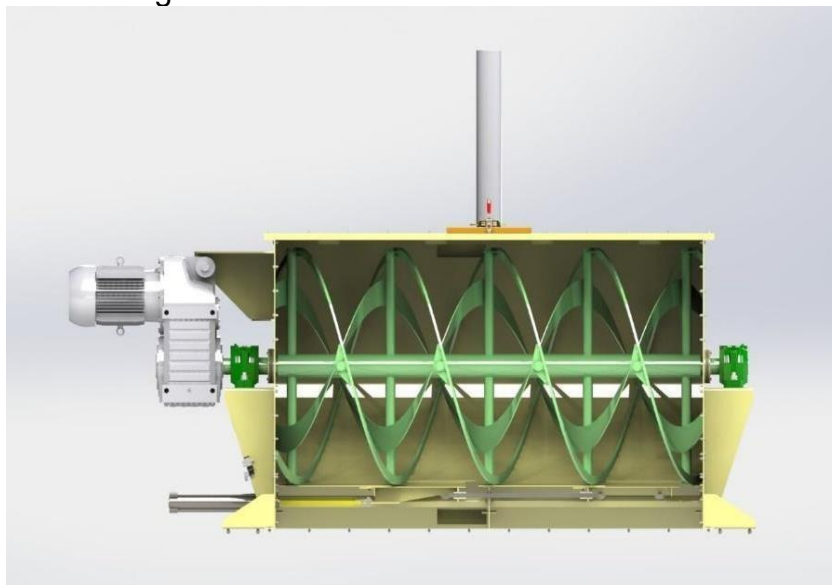
Bridgwater (2012) demonstrou em seu estudo que existem três mecanismos físicos envolvidos nos equipamentos de mistura: convecção, difusão e cisalhamento. A convecção ocorre a partir do movimento de partículas que são deslocadas umas em relação às outras pela ação do misturador até a homogeneização. A difusão é considerada uma operação que impulsiona a mistura de partículas ao longo do eixo longitudinal do misturador, com o material passando por períodos em um estado denso e compactado. Em seguida, pela ação do misturador, o material é distribuído sobre uma superfície, resultando em um novo conjunto de contatos partícula-partícula. Por fim, o cisalhamento é um mecanismo que reconhece que os pós sofrem convecção devido ao desenvolvimento de regiões estreitas chamadas zonas de deslizamento, nas quais o gradiente de velocidade é alto. Fora dessas zonas, corpos inteiros de partículas se movem quase como blocos. Esse mecanismo está relacionado à convecção e, particularmente, ligado a uma alta tensão de cisalhamento em um pó que estende a área de contato de dois grupos de partículas e quebra aglomerados.

Existem duas classes principais de equipamentos utilizados para a mistura de pós. Na primeira classe, as paredes dos misturadores são rotativas, conhecidos também como misturadores de tombo, onde o material se espalha por dentro, aplicando-se aos mecanismos físicos de cisalhamento e difusão. Na segunda classe de misturadores, as paredes ficam estacionárias, ou misturadores de vaso fixo, onde há um rotor interno ou rotores equipados com impelidores que causam agitação, e o mecanismo físico que atua predominantemente nesses misturadores é a convecção (BRIDGWATER, 2012).

Para a homogeneização dos ingredientes, as indústrias geralmente utilizam dois tipos de misturadores de paredes estacionárias: o vertical e o horizontal. O misturador horizontal (conforme ilustrado nas Figuras 4 e 5) é o mais comum na indústria de nutrição animal de maior porte, pois oferece um tempo menor de homogeneização (de 3 a 5 minutos), além de possuir compartimentos que facilitam a descarga do produto acabado e a realização da limpeza (LIMA; NONES, 1997a).

Esses misturadores são providos de fitas ou pás, podendo ter um ou dois eixos que realizam a mistura através do movimento dos ingredientes de um lado para o outro, dividindo-os em várias partes e promovendo uma mistura eficiente ao longo de todo o misturador (LIMA; NONES, 1997b).

Figura 4: Misturador horizontal helicoidal.



Fonte: Maggisan Máquinas, n.d.

Figura 5: Misturador horizontal de pá.



Fonte: Makalves Indústria, n.d.

Os misturadores verticais (conforme ilustrado na Figura 6) são compostos por uma ou duas roscas verticais no eixo central. Possuem um tempo de mistura bastante variável e geralmente superior ao misturador horizontal, podendo-se encontrar misturadores com tempo ótimo de mistura de 3 a 19 minutos. A mistura das matérias-primas ocorre no topo e na base do misturador através do efeito cascata. Esse tipo de misturador é amplamente utilizado em fazendas devido ao seu baixo custo (LIMA; NONES, 1997b).

Figura 6: Misturador vertical.



Fonte: Adrimaq Máquinas e Implementos, n.d.

Misturadores com paredes rotativas são amplamente utilizados para misturar pós em quantidades menores em diversas indústrias, como farmacêutica, cosmética, mineração, alimentícia, energia, polímeros e semicondutores. Disponíveis em uma variedade de tamanhos, esses misturadores são fáceis de usar, mais econômicos e podem lidar com uma variedade de propriedades de materiais, incluindo compostos sensíveis ao cisalhamento. O misturador em forma de V (conforme ilustrado na Figura 7) é um dos misturadores rotativos mais comuns usados para misturar materiais granulares na indústria farmacêutica (LEMIEUX et al., 2007).

Os misturadores em forma de V consistem em dois cilindros do mesmo comprimento, conectados em um ângulo entre 75° e 95°. São equipamentos comuns para a mistura de bateladas de sólidos em diversas indústrias, principalmente na farmacêutica, devido à sua relativa facilidade de limpeza. Como a mistura entre os dois cilindros é considerada lenta em comparação com outros tipos de misturadores, algumas modificações foram propostas para melhorar a eficiência do misturador. Por exemplo, o uso de cilindros não uniformes, a adição de palhetas ao eixo rotativo e a introdução de movimento de balanço na direção axial para aumentar os distúrbios de fluxo (KUO et al., 2005).

Figura 7: Misturador V.



Fonte: Autoria própria, 2023.

O misturador de Bin (conforme ilustrado na Figura 8), que consiste em utilizar o próprio carrinho como misturador, é amplamente utilizado pela indústria, juntamente com o misturador em forma de V, quando são escolhidos misturadores em que as paredes se movimentam. Este tipo de misturador rotativo utiliza forças gravitacionais e rotacionais como forças motrizes para misturar pós. Entretanto, ele apresenta uma limitação em seu desempenho quando se trata de pós coesivos. Isso ocorre devido ao fato de que o misturador utiliza pouca força dissipada para desagregar as partículas aglomeradas. Consequentemente, se o misturador for preenchido com camadas de diferentes pós coesivos, esses materiais podem permanecer juntos e não se misturarem adequadamente (ARRATIA *et al.*, 2006). Esse desafio torna-se relevante em determinadas formulações de produtos para alimentação animal, como premixes, núcleos e suplementos, devido a mistura de ingredientes minerais, especialmente os coesivos, como óxido de zinco.

Figura 8: Misturador Bin.



Fonte: Autoria própria, 2023.

2.1.1.1. VOLUME DE OCUPAÇÃO DOS MISTURADORES

Para Toso e Morabito (2005), a quantidade mínima de produto no equipamento para que ocorra uma mistura eficiente é a metade do volume útil do misturador. Zinn (1999) destaca que o volume de ocupação ideal do misturador dependerá da especificação do equipamento, pois embora alguns misturadores são eficientes mesmo em volumes muito baixos, a maioria não é.

Na Tabela 1 são apresentadas as quantidades mínimas e máximas de uma batelada de produto para três tipos de misturadores, conforme a literatura

Tabela 1: Volume útil para misturadores em relação ao volume total.

Misturador	Batida mínima	Batida máxima
Misturador Bin/ V	-	50 – 60%
Misturador helicoidal	30%	70 – 80%
Misturador de pá	30 – 40%	70 – 80%

Fonte: Powder Process, n.d.

Na prática é comum observar que as indústrias utilizam como referência as recomendações de volume de ocupação dos misturadores dadas pelos fabricantes de equipamentos. No entanto, muitas vezes não se tem acesso aos estudos de validação que levaram as recomendações dadas pelos fabricantes e que critérios foram considerados nessa avaliação da eficiência do equipamento. A depender da aplicação em cada indústria, as operações de mistura de pós podem ser mais ou menos complexas, considerando, por exemplo, o número de ingredientes que compõem a

formulação, assim como o nível de inclusão e as características físicas dos ingredientes. Além da complexidade das formulações, em muitos casos o número de produtos é elevado e com um volume de produção de cada produto amplamente variável em uma fábrica de ração. Por mais que haja uma adequação do tipo e número de equipamentos para as aplicações industriais e suas variadas demandas, a combinação dos fatores acima muitas vezes origina limitações para o processo de mistura de alguns produtos, considerando seu volume de ocupação.

Tanto volumes muito grandes quanto muito pequenos de ocupação do misturador podem resultar em uma mistura inadequada. No primeiro caso, o misturador pode impedir que os ingredientes se misturem adequadamente, especialmente nos de vaso fixo que contém agitadores ou impelidores (como pás, fitas e helicoides), os quais ficam totalmente submersos na massa de produto localizados na parte superior do equipamento. No segundo caso, quando o misturador opera abaixo da sua capacidade nominal, sua eficiência na mistura pode ser significativamente reduzida, o que não é recomendado (FEI, 2009).

Intimamente relacionado ao volume útil do misturador, o tempo de mistura é um fator crucial para sua qualidade (ZINN, 1999). Para cada tipo de misturador, é necessário determinar o tempo mínimo de mistura adequado para garantir a distribuição uniforme dos ingredientes da formulação no produto. Inclusive pode haver variação no tempo de mistura em função do volume de ocupação do misturador. A Orientação Normativa nº03/2020 do MAPA, relativa aos procedimentos de fiscalização dos estabelecimentos de produtos destinados à alimentação animal com base nas BPF, define que a empresa deve realizar teste de homogeneidade de mistura para definir o tempo para alcançar um coeficiente de variação ideal, levando em conta a capacidade máxima/mínima do misturador.

Em geral, quanto maior o número de rotações por minuto (RPM), mais rápido e eficiente é o processo de mistura. No entanto, a velocidade ideal de cada misturador pode variar de acordo com seu tipo e pode também mudar ao longo da vida útil do equipamento, devido ao desgaste normal, acúmulo de ingredientes ou outras condições (FEI, 2009).

Em uma lógica de otimizar a produtividade de uma fábrica de ração a partir do processo de mistura, deve-se considerar a máxima capacidade volumétrica útil dos misturadores para definir a “batida padrão” (termo comumente usado). No entanto, quando a densidade aparente da formulação é elevada, a quantidade em peso e não em volume passa ser o fator limitante da batida padrão, devido a máxima capacidade do torque do equipamento, que se excedida poderá comprometer seu funcionamento. Esse tipo de situação comumente ocorre em formulações com altas inclusões de ingredientes minerais (núcleos, suplementos e premixes), resultando em alta densidade (muitas vezes superior a 1100 kg/m^3), que mesmo operando na capacidade máxima de torque do eixo do equipamento, o volume ocupado pela batelada no vaso do misturador é baixo e, em alguns casos, inferior ao volume mínimo de especificação. Há também situações em que a demanda de fabricação de alguns produtos é muito baixa, não atingindo o volume mínimo para o processo de mistura, gerando desperdício, dada produção acima da demanda necessária, ou ainda inviabilizando a sua produção sem comprometer os requisitos de qualidade se fosse produzido na quantidade real demandada. Mensurar esse grau de comprometimento à qualidade, se de fato há, é um dos objetivos dessa pesquisa.

2.1.2. AMOSTRAGEM DA MISTURA

Para avaliar a eficiência do processo de mistura de pós é necessário realizar uma amostragem da batelada produzida e conduzir um teste de homogeneidade de mistura. A amostragem é definida como a técnica estatística de coletar apenas algumas amostras de uma população, de modo que suas características possam ser representativas. Métodos experimentais convencionais de amostragem de pó incluem amostragem de ladrões, fatiamento e análise das imagens de um leito de partículas usando espectrofotômetro de cores e sonda óptica (KAMESH *et al.*, 2022). O principal amostrador utilizado na prática de amostragem de produtos pelas indústrias é o calador (tipo ladrão); (Figura 9) ou ainda a concha.

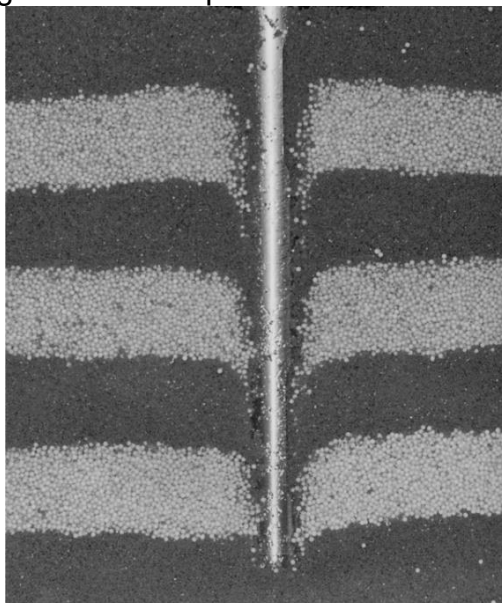
Para conduzir um teste de homogeneidade de mistura, além do aparato de coleta, deve ser elaborado um plano de amostragem, ou seja, as amostras devem ser colhidas em todos os pontos da mistura, e de modo similar, para que sejam representativas do todo. O plano deve contemplar ainda o número de amostras e a quantidade/tamanho de cada amostra.

O local de coleta depende de cada fábrica, dos seus equipamentos e pontos de acesso, de modo que permita uma amostragem adequada e ao mesmo tempo segura para execução dos operadores. Alguns misturadores possuem pontos de acesso à mistura. Nesses casos, se os acessos permitirem a amostragem em diversos locais, as amostras poderão ser coletadas diretamente do misturador, assim que o tempo de mistura adotado finalizar. Para os casos de amostragem pós-mistura, como no ensaque ou descarga em caminhões, as amostras devem ser coletadas ao longo do tempo de realização dessas operações, por batida, para garantir a sua representatividade.

Sobre o número de amostras, comumente se observa testes de homogeneidade de mistura com 6 a 10 amostras. Números inferiores podem não ser representativos e qualquer variação (incluindo a analítica) em um dos pontos passa a ter grande impacto sobre o desvio padrão dos dados e, conseqüentemente, sobre o coeficiente de variação. Números elevados de amostras representam custos significativos para as análises.

O tamanho da amostra deve guardar proporcionalidade com o tamanho da batida e deve atender as recomendações de cada laboratório de análise para quantidade mínima a ser enviada.

Figura 9: Desempenho da sonda ladrão.



Fonte: Muzzio et al., 2003.

2.2. CARACTERÍSTICAS DOS INGREDIENTES E HOMOGENEIDADE DE MISTURAS

A qualidade das misturas é dada pela combinação de fatores, que vão desde: as características dos equipamentos, como tipo de misturador, nível de desgaste, desenho da linha de produção; as características operacionais, como volume de ocupação, formulação, sequência de adição de ingredientes, tempo de mistura etc.; e por último, porém não menos importante, as características dos ingredientes. Dentre as propriedades dos ingredientes que afetam a homogeneidade das misturas pode-se destacar: tamanho de partículas, densidade, formato das partículas, cargas eletrostáticas, higroscopia, fluidez, compressibilidade, concentração, aderência e percolação de partículas (AXE, 1995). Quanto maior o número de ingredientes em uma formulação e mais distintas são suas propriedades físicas, mais complexo torna-se o processo de homogeneização. Apesar de todas as propriedades exercerem algum impacto, de modo geral, o tamanho e o formato das partículas, assim como a densidade, são preponderantes para a eficiência do processo de mistura (AXE, 1995).

2.2.1. DENSIDADE

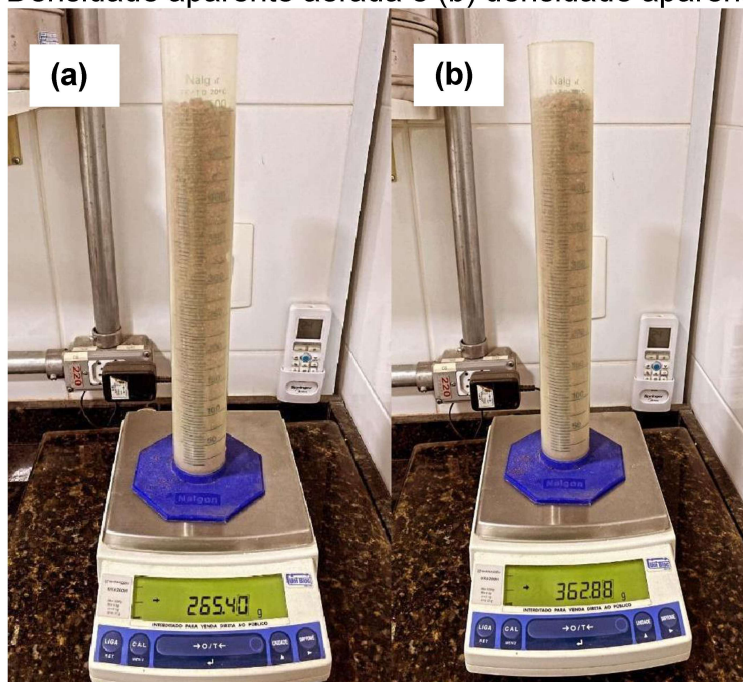
A densidade de um pó é definida como a relação entre sua massa e o volume que ocupa. A densidade aparente de um pó pode variar significativamente dependendo de várias condições, como vibração, compactação, consolidação e fluidização, entre outras. Essa variação na densidade aparente pode afetar diretamente a fluidez do pó (GARG; DENG; BRADLEY, 2022)

Existem dois métodos básicos para avaliar a densidade ou massa específica aparente de um pó: o método de densidade aparente aerada (Figura 10a) e o método de densidade aparente compactada (Figura 10b).

No método de densidade aparente aerada, o pó é deixado dispersar-se e assentar em um recipiente sob a influência da gravidade. Um pó com uma estrutura mais resistente ao colapso terá uma baixa densidade aparente, enquanto um pó com uma estrutura mais fraca colapsará facilmente e terá uma alta densidade aparente. O atrito elevado entre as partículas resulta em uma densidade aparente mais baixa. À medida que o atrito diminui, a densidade aparente aumenta.

Por outro lado, o método de densidade aparente compactada é realizado após a agitação do recipiente contendo a amostra. Um pó coesivo terá uma significativa compactação durante a agitação, enquanto um pó de fluxo livre terá pouco espaço para consolidação adicional. Durante o processo de batida, as partículas de pó são forçadas a saltar e perder contato umas com as outras por um momento. Quando o atrito entre as partículas é reduzido, elas se reorganizam, resultando em melhores condições de empacotamento (ABDULLAH; GELDART, 1999).

Figura 10: (a) Densidade aparente aerada e (b) densidade aparente compactada.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Guo et al. (2016) utilizaram em seu estudo o método mais comum nas indústrias para determinar a densidade aparente aerada. Esse método consiste em adicionar lentamente as amostras desejadas no recipiente, deixando o excesso de amostras no topo, nivelando-as com o auxílio de uma barra de metal redonda. Os autores empregaram como amostras as matérias-primas cevada, aveia, canola e trigo, moídas em moinhos de martelo com peneiras de 19,05 mm, 25,50 mm e 31,75 mm. Eles concluíram que a maior densidade da amostra foi obtida quando a palha de canola foi moída em moinho de martelo com peneira de 31,75 mm, enquanto a palha de trigo, cevada e aveia foi moída com peneira de 25,4 mm.

Quando há diferença de densidade ou tamanho de partícula dos ingredientes, é mais provável que ocorra segregação em vez de mistura. Nesse contexto, observa-

se que a diferença de densidade desempenha um papel importante, pois as partículas mais pesadas tendem a afundar para níveis mais baixos na camada de fluxo, enquanto as mais leves tendem a subir. Já quando as partículas diferem em tamanho, as menores tendem a cair pelos interstícios entre as partículas maiores para níveis mais baixos no fluxo (JAIN; OTTINO; LUEPTOW, 2005).

2.2.2. TAMANHO DAS PARTÍCULAS

O tamanho de partícula é considerado o principal fator na segregação, pois quando os tamanhos de partículas de dois ingredientes são muito diferentes, eles tendem a se separar (AXE, 1995).

Em uma mistura com ingredientes de diferentes características físicas, muitos autores consideram a diferença de tamanho das partículas entre as matérias-primas como o parâmetro mais importante para a segregação. A escolha de ingredientes com tamanhos de partículas semelhantes para a mistura em pó é um dos fatores-chave que determinam a homogeneidade da mistura, pois geralmente as partículas pequenas tendem a se direcionar para baixo, levando à segregação. À medida que o tamanho das partículas diminui para um determinado pó, sua área de superfície aumenta, o que fortalece as forças intermoleculares e reduz a facilidade de fluxo do pó, o que pode diminuir a tendência à segregação (SHENOY *et al.*, 2015).

A caracterização do tamanho de partícula é de grande importância, especialmente considerando que pós com partículas menores têm menor fluidez e tendem a ser mais coesos e segregativos. Partículas menores geralmente causam problemas de manuseio, pois se tornam mais coesas e segregativas à medida que o tamanho das partículas diminui (BENKOVIĆ *et al.*, 2013).

Menbari e Hashemnia (2020) estudaram em seu trabalho o comportamento da mistura de duas partículas de tamanhos diferentes ao longo do tempo em um leito vibrado verticalmente. Eles observaram que as partículas menores adicionadas na parte superior do recipiente tentaram alcançar o fundo do mesmo. Isso ocorreu porque as partículas pequenas preencheram os vazios iniciais entre as partículas grandes e ocupando, portanto, menos volume após a mistura.

Atualmente, o método de peneira, conhecido como DGM (Diâmetro Geométrico Médio), é o mais utilizado para investigar o tamanho das partículas na nutrição animal. Esse método envolve a peneiração (conforme figura 11) dos produtos alimentares em diferentes classes de tamanho de abertura (tylers) e a apresentação das massas em cada classe. Em seguida, o tamanho de partícula pode ser calculado e expresso por meio do DGM. Embora seja um método de baixo custo e de fácil aplicação, algumas desvantagens incluem a aderência de partículas pequenas às peneiras devido às forças eletrostáticas, bem como o entupimento das peneiras por ingredientes com alto teor de gordura. O uso de um agente dispersante pode ajudar a evitar o entupimento durante o peneiramento (LYU *et al.*, 2020).

Figura 11: Vibrador de peneiras.



Fonte: Autoria própria, 2023.

O estudo realizado por Biazzi *et al.* (2022) investigou vários métodos de peneiramento para estimar o tamanho das partículas de milho moído em moinho de martelos, utilizando peneiras de diferentes tamanhos (1, 2, 3, 4, 5 ou 12 mm). Os autores adotaram o método de peneiramento empilhado com secagem prévia a 105°C como referência e testaram diferentes tratamentos, incluindo a utilização de agitadores (duas esferas de borracha de 25 mm), com ou sem secagem prévia, com conjunto de peneiras empilhadas ou invertidas, e utilizando seis tipos de milho moído. Os resultados mais promissores foram obtidos com o método de peneiramento

reverso combinado com agitadores, que permitiram uma maior passagem de partículas de milho pelas peneiras, evitando bloqueios e possibilitando uma melhor caracterização da granulometria do milho moído.

Baseando-se nessa premissa, Axe (1995) desenvolveu uma metodologia para determinar o número de partículas, estabelecendo uma correlação entre o tamanho e o número de partículas. De acordo com essa metodologia, para um determinado volume ou peso constante, o número de partículas aumenta à medida que o tamanho das partículas diminui (conforme ilustrado na Tabela 2). Essa relação promove a uniformidade na distribuição das partículas. O uso de microingredientes com um alto número de partículas garante uma adição precisa de partículas por unidade de ração, contribuindo para a consistência e qualidade do produto final.

Tabela 2: Relação entre o tamanho da partícula e o número de partículas

Tamanho de Partícula	(Diâmetro μm)	Número de Partículas
18	1000	1.530
20	840	2.580
25	710	4.350
30	590	7.460
40	420	20.800
60	250	84.700
80	177	281.000
100	149	392.000
140	100	120.0000
200	74	3.260.000
325	45	15.600.000

Fonte: Axe, 1995.

2.2.3. FORMA FÍSICA DAS PARTÍCULAS

No estudo de Axe (1995), a forma física das partículas foi definida em termos de duas características distintas: forma e proporção. A forma se refere ao grau em que uma partícula se assemelha a uma forma definida, como um cubo, tetraedro ou esfera, enquanto a proporção refere-se às dimensões relativas que distinguem um cuboide, tetraedro ou esferoide de outros na mesma classe. A forma das partículas influencia propriedades como fluidez e capacidade de empacotamento, sendo que

partículas escamosas, como cascas, tendem a ser difíceis de manusear devido ao entrelaçamento e formação de obstruções ao fluxo. Quando as formas das partículas na mistura são muito diferentes, elas têm maior tendência à segregação. Por outro lado, quanto mais semelhantes forem as formas das partículas dos ingredientes, melhor será a mistura.

Partículas esféricas são consideradas mais desejáveis porque apresentam propriedades ideais de dispersão e têm melhor comportamento em termos de deformação mecânica. Em comparação com partículas laminares, as esféricas têm menor probabilidade de quebrar (PARINI, 2003).

Para analisar a forma física das partículas, uma ferramenta comumente utilizada são os softwares de análise de imagem, como o ImageJ. Essas ferramentas permitem a medição de partículas magnetizadas obtidas de diferentes maneiras (química, biológica e física), e as áreas podem ser calculadas contando os pixels em áreas selecionadas pelo usuário ou de acordo com algoritmos específicos. Essa abordagem fornece uma avaliação quantitativa e precisa da forma das partículas, permitindo uma análise detalhada das características do material em estudo (HANNICKEL *et al.*, 2002).

2.3. AVALIAÇÃO DA HOMOGENEIDADE DE MISTURAS

O teste de homogeneidade avalia a capacidade do misturador em realizar uma boa mistura, sendo um dos requisitos das Boas Práticas de Fabricação das indústrias de alimentação humana e animal. Uma mistura adequada garantirá que todos os ingredientes estejam uniformemente distribuídos nos produtos e, conseqüentemente, que todos os animais consumirão as quantidades necessárias de nutrientes.

A homogeneidade da mistura é usualmente avaliada pelos seguintes métodos:

- Avaliação da concentração de determinada substância presente na mistura ou intencionalmente adicionada, como minerais, aminoácidos, vitaminas etc., sendo o resultado expresso pelo Coeficiente de Variação (CV);
- Avaliação por contagem de partículas metálicas (*microtracer*), sendo o resultado expresso em termos de Probabilidade (P).

Uma mistura é considerada homogênea quando o resultado do método de avaliação utilizado for inferior ao respectivo limite aceitável (BRASIL, PORTARIA 798/2023), sendo:

Tabela 3: Métodos de avaliação de mistura.

MÉTODO	EXPRESSÃO DOS RESULTADOS	LIMITE ACEITÁVEL
Concentração da substância	Coeficiente de Variação (CV)	Menor que 10%
Contagem de partículas metálicas	Probabilidade (P)	Maior que 5%

Fonte: Autoria própria, 2023.

Observa-se que o CV é mais comumente utilizado pelas indústrias de alimentação animal para avaliar a homogeneidade de misturas. Isso se deve, em partes, a não necessidade de incluir um indicador específico à mistura (partículas metálicas), podendo utilizar algum componente já presente na formulação e que já é de rotina analítica de seus laboratórios.

2.3.1. COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

O coeficiente de variação (CV) é definido como uma medida de dispersão para estimar a variabilidade de um conjunto de dados ou a precisão de uma média, sendo utilizado como ferramenta para avaliação da qualidade de misturas.

Para calcular o CV utiliza-se a Equação 1:

$$CV\% = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100 \quad (1)$$

Onde:

- CV = Coeficiente de variação.
- σ = Desvio padrão
- $\bar{x}$ = Média dos dados

Após um período de homogeneização, espera-se que a concentração de um nutriente seja uniforme em toda a mistura. Quando a mistura é idealmente perfeita, o coeficiente de variação (CV) será igual a zero, indicando que não há variação na concentração do nutriente ao longo da mistura (ROCHA; MALLMANN, 2014). Na prática um CV igual a zero não existe, sendo admitido limites de tolerância para afirmar que a mistura de pós é homogênea.

Clark et al. (2007) ao testarem diversos tipos de indicadores ($n=11$) e tempos de mistura, não observaram nenhum resultado inferior a 5% de CV, concluindo que um CV de até 10% pode ser considerado uma boa mistura. Na revisão de Dantuma (2018), o autor afirma que um CV de 10% ou inferior é considerado um grau aceitável de variação, o que indica que a mistura é quase totalmente homogênea. No entanto, alguns autores sugerem classificar os coeficientes de variação de mistura como excelentes quando inferiores a 10%, boas entre 10 e 20%, e ruins acima de 20% (MOHALLEM *et al.*, 2008).

No Brasil, a referência regulatória atual para avaliação de CV é a Portaria 798/2023, que traz as diretrizes para a produção e utilização de produtos destinados à alimentação animal com medicamentos de uso veterinário. Segundo essa normativa, uma mistura de qualidade é aquela que possui um coeficiente de variação inferior a 10% (BRASIL, 2023).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O projeto de pesquisa é uma parceria entre a AniFeed e o Programa de Pós-Graduação do curso de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Uberlândia, campus Patos de Minas. O experimento e suas análises foram conduzidos nas instalações da empresa AniFeed, entre janeiro de 2023 e maio de 2024.

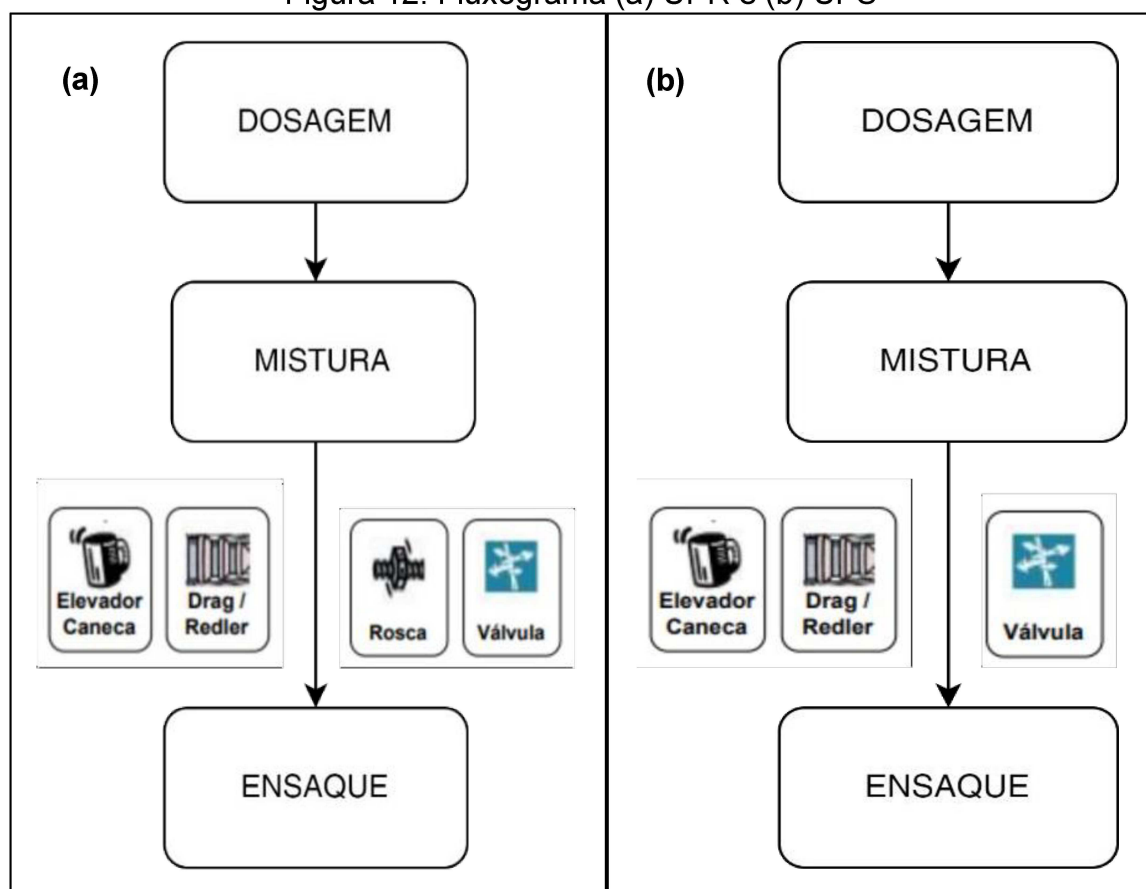
3.1. CARACTERÍSTICAS DOS MISTURADORES E LINHAS DE PRODUÇÃO

A empresa AniFeed possui duas linhas de produção distintas: uma destinada à fabricação de rações e concentrados (Unidade de Produção de Rações - UPR) e outra para a produção de suplementos, núcleos e premixes (Unidade de Produção de Suplementos - UPS). Cada linha de produção foi projetada com um design específico,

abrangendo desde a dosagem dos ingredientes até o ensacamento dos produtos finais, como ilustrado nos fluxogramas apresentados nas Figuras 12a e 12b.

Na UPR, o misturador utilizado é do tipo horizontal com duplo helicoide, com um volume útil de 4,68 m³ e uma capacidade do motor de até 2250 kg. As matérias-primas com grandes quantidades de inclusão na fórmula são dosadas em silos dosadores, enquanto aquelas com menor inclusão são dosadas manualmente e alimentadas em um transportador de rosca. Após a pesagem, a batelada é encaminhada para o pré-misturador, onde aguarda a desocupação do misturador. Da mesma forma, após a mistura, a batida é transferida para o pós-misturador, onde aguarda a liberação do silo de ensaque. O trajeto que leva o produto do pós-misturador para o ensaque é composto por um sistema de transporte que inclui um transportador de rosca, um transportador de arraste tipo Drag/Redler, um elevador de canecas e uma válvula rotativa, alcançando o silo por gravidade.

Figura 12: Fluxograma (a) UPR e (b) UPS



Fonte: Autoria própria, 2023.

Na UPS, o misturador utilizado é do tipo horizontal com duplo eixo de pás, com um volume útil de 4,70 m³, e a capacidade do motor é de 2400 kg. As matérias-primas com grandes quantidades de inclusão na fórmula são dosadas em silos dosadores, enquanto aquelas com menor inclusão são dosadas manualmente e alimentadas diretamente no pré-misturador. A batelada aguarda no pré-misturador até a desocupação do misturador. Da mesma forma, após a mistura, a batida é transferida para o pós-misturador, onde aguarda a liberação do silo de ensaque. O trajeto que leva o produto do pós-misturador para o ensaque é composto por um sistema de transportador de arraste tipo Drag/Redler, um elevador de canecas e uma válvula bifurcada, chegando ao silo por gravidade.

3.2. DEFINIÇÃO DA FORMULAÇÃO DO PRODUTO

A equipe de Formulação e Desenvolvimento (F&D) da empresa colaborou na elaboração de um produto que atendesse aos requisitos da pesquisa, cuja formulação apresentasse desafios para homogeneização em função da variabilidade de características físicas dos ingredientes, especialmente densidade, tamanho e formato de partículas, incluindo os veículos. Além disso, era necessário que a formulação desenvolvida apresentasse uma densidade que não ultrapassasse o volume útil dos misturadores e com peso inferior a 2250 kg (limite de capacidade do motor do misturador helicoidal), a fim de que pudesse ser produzida a mesma formulação em ambos os misturadores para estabelecer a análise comparativa para o produto alvo. Com base nas características de volume dos misturadores e capacidade dos motores, foi determinado que o produto deveria ter uma massa específica (MEA) alvo de 534,19 kg/m³, conforme calculado pela Equação 1.

$$MEA = \frac{m}{v} \quad (2)$$

Em que:

m = massa (kg)

v = volume (m³)

Assim,

$$MEA = \frac{2250 \text{ kg}}{4,68 \text{ m}^3 * 0,9} = 534,19 \text{ kg/m}^3$$

onde 0,9 representa o limite de 90% do volume útil do misturador, a fim de ter uma margem de segurança para a variação de MEA que ocorre nos ingredientes.

Foram utilizados valores de MEA do histórico de monitoração dos ingredientes para resultar na formulação de um premix mineral-vitamínico com 534 kg/m³ (Tabelas 3 e 4). Os níveis de minerais e vitaminas da formulação foram baseados em um produto comercial com inclusão de 1 kg/ton para atendimento das exigências nutricionais de suínos na fase de terminação. Foram utilizados ingredientes convencionais como fontes de minerais e vitaminas. Foi definido o uso de casca de arroz, calcário calcítico e caulim como veículos. A maior inclusão foi de casca de arroz, justamente por possuir baixa densidade e maior tamanho de partículas, assim como distinção no seu formato, especialmente se comparadas tais características com as fontes de minerais utilizadas como indicadores para homogeneidade de mistura.

Tabela 4: Composição de ingredientes do premix mineral vitamínico utilizado no estudo.

Ingrediente	Inclusão (%)
Casca de arroz	54,60
Calcário calcítico	11,61
Caulim	11,10
Pré-mistura de vitaminas*	8,00
Sulfato ferroso	8,25
Óxido de zinco	2,50
Sulfato de cobre	2,00
Óxido de manganês	1,50
Diluição de iodato de cálcio	0,40
Selenito de sódio	0,04

**Composta de: Ácido fólico; Pantotenato de cálcio; Biotina; Niacina; Vitamina A; Vitamina B1; Vitamina B12; Vitamina B2; Vitamina B6; Vitamina D3; Vitamina E; Vitamina K; BHA (Butil hidroxianisol); BHT (Hidróxido de tolueno butilado), Etoxiquin; Ácido cítrico; Dióxido de silício; Veículo (16% Caulim, 8% Casca de arroz e 5% Calcário calcítico). Fonte: Autoria própria, 2023.

Todas as matérias-primas utilizadas foram do mesmo lote, a fim de diminuir a variação de características físico-químicas entre os tratamentos.

3.3. VOLUME DE OCUPAÇÃO DOS MISTURADORES

Para avaliar o impacto do volume de ocupação de cada misturador sobre a homogeneidade da mistura, o produto foi produzido em diferentes quantidades de bateladas, conforme a Tabela 4.

Tabela 5: Volumes de ocupação teórico dos misturadores utilizados na fabricação do premix

Percentual de ocupação do volume útil (%VU)	Batelada (kg)	Volume ocupado no misturador (m ³)
10	250	0,47
30	750	1,40
50	1250	2,34
70	1750	3,28
90	2250	4,21

Fonte: Autoria própria, 2023.

Para cada um dos tratamentos foram produzidas três bateladas (repetições).

3.4. PROCEDIMENTO DE MISTURA

A sequência de dosagem e descarga dos ingredientes no compartimento de pré-mistura foi organizada da seguinte forma:

1. Casca de arroz;
2. Pré-mistura vitamínica;
3. Ingredientes fonte dos microminerais (sulfato ferroso, óxido de zinco, sulfato de cobre, óxido de manganês, iodato de cálcio e selenito de sódio);
4. Caulim;
5. Calcário calcítico.

Essa sequência foi estabelecida de modo a garantir que os ingredientes fonte dos microminerais, principais elementos utilizados como indicadores da homogeneidade das misturas, fossem descarregados no misturador no meio da massa. Tal procedimento visa evitar que os ingredientes de menor inclusão fiquem em pontos estagnantes do misturador.

Após todos os ingredientes serem adicionados ao compartimento de pré-mistura, o produto foi liberado para o misturador, onde permaneceu em homogeneização pelo tempo total de 420 segundos (7 minutos). O tempo de mistura convencional validado pela empresa para ciclos de mistura seca era de 120 segundos em ambos os misturadores. Esse tempo de mistura foi extrapolado em 3,5 vezes para o experimento como margem de segurança, a fim de isolar a hipótese de que um maior tempo de mistura poderia compensar o desafio de homogeneização eventualmente presente em determinados volumes de ocupação dos misturadores (10 e 30%, por exemplo).

Após o término da mistura e amostragem do produto, o mesmo foi liberado para o compartimento de pós-mistura e, finalmente, encaminhado para o ensaio, utilizando roscas e elevadores de transporte.

3.5. PROCEDIMENTO DE AMOSTRAGEM

Após o término da mistura, foram coletadas 10 amostras de cada batelada, em diferentes pontos, a fim de caracterizar uma amostragem representativa. Para o misturador helicoidal as coletas foram realizadas no próprio misturador, visto que ele possui comportas que fornecem acesso ao seu interior. Para o misturador de pás as coletas foram realizadas no compartimento de pós-mistura, imediatamente após o misturador, sendo o ponto da linha mais próximo do equipamento que permitia acesso ao produto.

A quantidade de amostra coletada em cada batelada foi proporcional à quantidade total da batida, de modo a manter a representatividade amostral. Para o misturador helicoidal a amostragem foi realizada com calador graneleiro de aço inox 2,10 m (Figura 13). As amostras coletadas em cada ponto foram armazenadas em embalagens plásticas devidamente identificadas.

Figura 13: Calador de graneleiro de inox.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Para o misturador de pás a amostragem foi realizada no final da calha do transportador de arraste, localizado abaixo do misturador, com 5,2 m de comprimento de extensão total, sendo 1,8 m projetados além da base do misturador, através de uma janela de inspeção que o equipamento possui, a qual permite a coleta de amostras por meio de uma concha à medida que o produto é movido pelos arrastadores fixos da corrente transportadora. Considerando que as bateladas variavam em quantidade, de acordo com o volume (Tabela 5), e visando manter a representatividade e escala da amostragem, as amostras foram retiradas de acordo com o esquema demonstrado na Tabela 5, na qual a quantidade amostrada e o intervalo de coleta diminuíam conforme o tamanho da batelada.

Tabela 6: Amostragem no pós-mistura da linha do misturador de pás.

Volume útil (%VU)	Peso total da batida (kg)	Quantidade de amostra coletada, por ponto (kg)	Intervalos de amostragem (s)
10	250	0,125	0:04
30	750	0,375	0:13
50	1250	0,625	0:22
70	1750	0,875	0:32
90	2250	1,125	0:41

Fonte: Autoria própria, 2023.

Todas as amostras foram identificadas e encaminhadas para o laboratório de controle de qualidade da empresa para realização das análises.

3.6. ANÁLISES LABORATORIAIS

Todas as análises foram realizadas no laboratório de controle de qualidade da empresa. No laboratório foi utilizado um equipamento quarteador para reduzir o tamanho das amostras, mantendo a sua representatividade. Para as análises de minerais as amostras foram moídas em moinho ultracentrífugo, na rotação de 18000 rpm, equipado com peneira 0,35 mm de abertura (ZM 200®, Retsch).

3.6.1. DENSIDADE

Foram conduzidas as análises de densidade aerada ou massa específica aparente (MEA). Para calcular a densidade das 10 matérias-primas e dos produtos acabados, foi utilizada uma proveta de vidro com capacidade de 1000 mL, na qual o produto foi adicionado na parte superior. Em seguida, a proveta com o produto foi pesada com o auxílio de uma balança semi-analítica de precisão de $\pm 0,01\text{g}$, e a massa da amostra dentro da proveta foi registrada. A densidade foi então calculada utilizando a Equação 3.

$$d = \frac{m}{v} \quad (3)$$

Em que:

d = densidade;

m = massa (kg);

v = volume (m^3).

3.6.2. TAMANHO DE PARTÍCULA

Para a determinação do tamanho de partícula, foi utilizado o Método do Diâmetro Geométrico Médio (DGM). Para realizar as análises de DGM, foi utilizado um equipamento vibrador com conjunto de 20 peneiras, com aberturas de 2,36, 2,00, 1,70, 1,40, 1,18, 1,00, 1,00, 0,85, 0,71, 0,60, 0,43, 0,36, 0,30, 0,25, 0,21, 0,15, 0,13, 0,063, 0,053 e 0,045 mm, além do fundo. Antes de colocar a amostra no vibrador de peneiras, esta foi homogeneizada em sua própria embalagem e, posteriormente, uma alíquota de 100 g foi pesada. A amostra foi inserida no equipamento pela parte

superior do conjunto de peneiras e, para diminuir os interferentes da amostra, como aglomeração ou bloqueio da peneira, foi adicionado 0,5 g de sílica precipitada (dióxido de silício).

Após a montagem do equipamento, a vibração foi ajustada por um período de 10 minutos. Em seguida, a quantidade retida na peneira superior foi transferida para um recipiente e pesada. Este procedimento foi repetido para todas as demais peneiras. O DGM foi calculado conforme a Equação 4.

$$d_{gw} = \log^{-1} \left[\frac{\sum (w_i * \log d_i)}{\sum w_i} \right] \quad (4)$$

Em que:

D_{gw} = diâmetro geométrico médio (DGM)

W_i = peso de amostra retido na i-ésima peneira

d_i = diâmetro da i-ésima peneira na pilha

Para o cálculo do d_i utilizou-se a Equação 5.

$$d_i = (d_u * d_0)^{0,5} \quad (5)$$

Em que:

d_u = diâmetro da abertura pela qual as partículas passarão (peneira posterior à d_i)

d_0 = diâmetro da abertura pela qual as partículas não passarão (i-ésima peneira)

As porcentagens de materiais retidos nas peneiras foram calculadas pela Equação 6.

$$\%R_i = \frac{w_i * 100}{w} \quad (6)$$

Em que:

%R_i = Porcentagem retida na peneira i

W_i = Peso retido na peneira i

W = peso total da amostra

Por fim, calculou-se o Desvio Padrão Geométrico, por meio da Equação 7.

$$s_{gw} = \log^{-1} \left[\frac{\sum (w_i (\log d_i - \log d_w)^2)}{\sum w_i} \right]^{-0,5} \quad (7)$$

Em que:

S_{gw} = desvio padrão geométrico (DPG)

W_i = peso de amostra retido na i-ésima peneira

D_i = diâmetro da i-ésima peneira na pilha

D_{gw} = diâmetro geométrico médio (DGM)

3.6.3. MICROSCOPIA

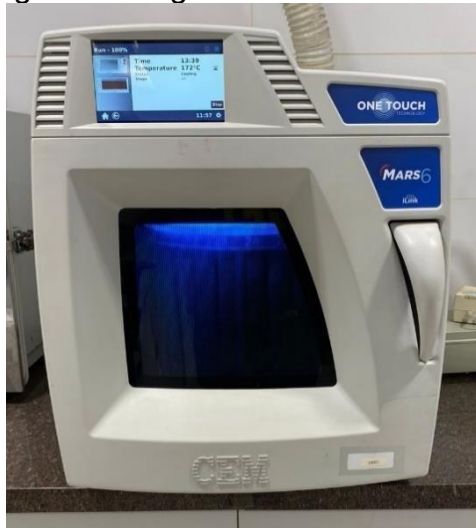
Não foi possível realizar as análises de forma física dos ingredientes em equipamento e software específico para definição de forma e medição de proporção. No entanto, foram tomadas imagens em microscópio estereoscópio (Lupa M80, LEICA®) aplicando uma taxa de zoom de 1,6 para complementar a caracterização física e evidenciar as diferenças entre os ingredientes.

3.6.4. ANÁLISE DE MINERAIS

Para calcular o CV dos tratamentos, ao invés de escolher um único analito como indicador, foi utilizada a técnica de varredura de minerais presentes nas amostras, por meio de Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma (ICP-OES), de acordo com o método 2021.041 do Compêndio Brasileiro de Alimentação Animal (2023), no qual as amostras foram avaliadas em duplicata. Os minerais analisados foram: cálcio, cobre, ferro, magnésio, manganês, sódio, enxofre, selênio e zinco. Inicialmente, realizou-se a digestão da amostra, pesando-se 40 g da mesma em tubos de teflon PFA. Em seguida, foram adicionados 5 mL de ácido nítrico e 3 mL de ácido clorídrico aos tubos. O selo de pressão (batoque) foi inserido, e os tubos foram

fechados com a tampa de segurança. Posteriormente, os tubos foram levados ao digestor (conforme mostrado na Figura 14).

Figura 14: Digestor de micro-ondas.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Após a digestão das amostras, estas foram transferidas para balões volumétricos (conforme mostrado na Figura 15), utilizando um funil de vidro. Alíquotas de 5 mL foram então transferidas novamente, por meio de micropipetas, para balões volumétricos de 100 mL, os quais foram avolumados com água destilada até o menisco. Finalmente, as amostras foram transferidas para tubos plásticos de polipropileno e submetidas à leitura pelo equipamento (conforme mostrado na Figura 16).

Figura 15: Amostra em balão volumétrico após a digestão.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 16: Equipamento ICP - Espectrometria de massa por plasma



Fonte: Autoria própria, 2023.

Além do resultado de CV ser expresso para cada indicador, foi utilizada a média de CV de todos os minerais analisados para compor um “indicador composto”. O critério de decisão para atestar sobre a homogeneidade da mistura foi obter um CV inferior a 10%.

3.7. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL, ANÁLISES ESTATÍSTICAS E *MACHINE LEARNING*

Para definir o volume mínimo de ocupação de cada misturador (helicoidal e de pás) com base no CV da mistura, foram estabelecidos cinco tratamentos, distribuídos em delineamento inteiramente casualizado, compostos pelos volumes de 10%, 30%, 50%, 70% e 90% de ocupação, com 3 repetições cada, totalizando 15 unidades experimentais.

Para comparar o desempenho dos diferentes misturadores quanto à homogeneidade da mistura do produto alvo, foi realizado um teste em esquema fatorial (5x2) com delineamento inteiramente casualizado, sendo os cinco volumes de ocupação (fator quantitativo) nos dois misturadores (fator qualitativo), com 3 repetições cada, totalizando 10 tratamentos e 30 unidades experimentais.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do ambiente de programação RStudio versão 4.0.2 (R CORE TEAM, 2023). Os pressupostos de normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias do modelo foram

examinados pelos testes de Shapiro-Wilk e Breusch-Pagan, respectivamente. Posteriormente, os dados foram analisados por meio de modelos de regressão, utilizando a função lm do pacote stats, tendo o tipo de misturador, os volumes de ocupação e suas interações como fatores principais. Para os dados de volume de ocupação do misturador os efeitos lineares e quadráticos foram estudados utilizando contrastes polinomiais. Quando ambos foram significativos, uma análise de variância foi conduzida para comparar os modelos lineares e quadráticos para a falta de ajuste, utilizando-se a função aov() do pacote stats. Quando a falta de ajuste foi significativa, optou-se pela equação quadrática como modelo final para explicar o comportamento dos dados. Para todas as análises a significância foi declarada quando $P \leq 0,05$, e os resultados foram apresentados como média $\pm$ erro padrão (EPM).

Através do software MATLAB versão 2023, uma árvore decisória baseada em algoritmo de aprendizagem supervisionado não paramétrico foi utilizada para complementar o entendimento do comportamento do CV da mistura, considerando a relação entre os fatores estudados, categorizando-o em alto ou baixo em relação à mediana. Para testar e validar a precisão dessas árvores de decisão, foi aplicado o método 'full-training-cross-validation' (FTCV).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS INGREDIENTES E DA FORMULAÇÃO

Os resultados de MEA, DGM e DPG dos ingredientes utilizados na formulação estão expressos na Tabela 6.

Tabela 7: Caracterização física (MEA, DGM e DPG) dos ingredientes que compuseram a formulação do premix utilizado no estudo.

Ingrediente	Inclusão (%)	MEA (kg/m ³)	DGM (μm)	DPG (μm)
Casca de arroz	54.60	378	412	1.82
Calcário calcítico	11.61	1414	234	2.02
Caulim	11.10	959	263	1.98
Sulfato ferroso	8.25	907	145	1.79
Pré-mistura de vitaminas	8.00	764	252	2.20
Óxido de zinco	2.50	532	173	1.85
Sulfato de cobre	2.00	1059	246	1.66
Óxido de manganês	1.50	1143	78	1.39

Continuação

Ingrediente	Inclusão (%)	MEA (kg/m³)	DGM (μm)	DPG (μm)
Diluição de iodato de cálcio	0.40	960	257	1.88
Selenito de sódio	0.04	1560	124	1.69

Fonte: Autoria própria, 2024.

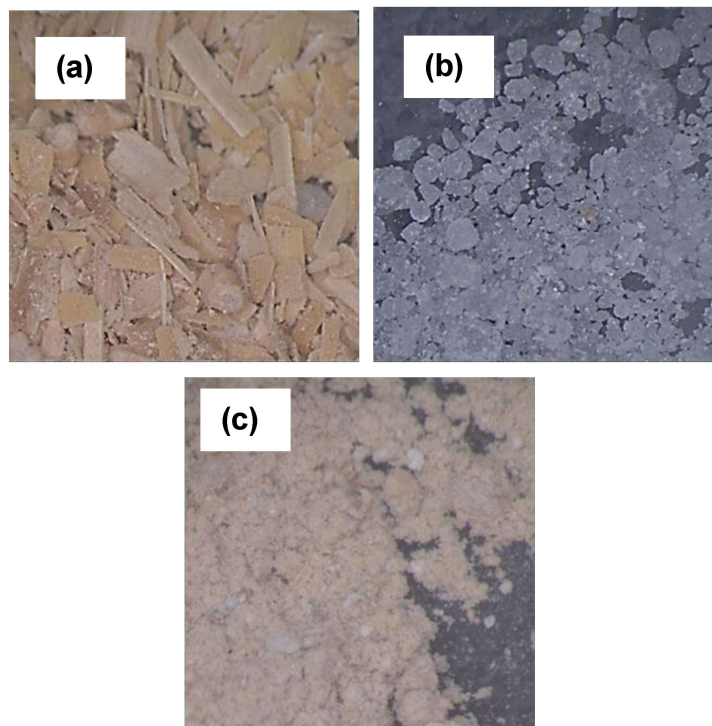
Conforme informações consideradas para o desenho da formulação, fica evidente que os ingredientes que compuseram a mistura apresentavam diferenças importantes de densidade e tamanho de partículas, logo o produto era desafiador para o processo de homogeneização. Além das características físicas, os níveis de inclusão das fontes de minerais eram distintos, destacando a baixa inclusão do selenito de sódio (0,04%), que foi adicionado diretamente à mistura do premix, sem uma pré-mistura, justamente para avaliar o desafio do nível de inclusão sobre o CV desse elemento. Quanto menor a inclusão de um determinado ingrediente, maior o desafio para a sua homogeneização em uma mistura, especialmente quando se utiliza uma grande quantidade de ingredientes na formulação e com diferentes propriedades físicas (IVANOV et al., 2009). Nesses casos, para atingir os requisitos de produto homogêneo (baixo CV), é comum o emprego de mistura em duas etapas, ou diluição, que consiste na pré-mistura dos ingredientes de menor inclusão para posteriormente serem incluídos na mistura final, favorecendo a homogeneização.

Apesar da sua baixa inclusão, o selenito de sódio possui baixo tamanho de partículas, característica que favorece a dispersão e probabilidade de ocorrência nos diversos pontos da mistura. Segundo Axe (1995), existe uma relação entre tamanho de partículas e o número de partículas, onde em um determinado volume e densidade constantes, o número de partículas aumenta à medida que o tamanho das partículas diminui. É essa relação que promove a uniformidade, pois o uso de microingredientes com um alto número de partículas garantirá a presença de partículas por unidade de ração (AXE, 1995). Não foi estimado o número de partículas de cada ingrediente a partir do tamanho médio de partículas, dado que a relação de Axe (1995) considera que os ingredientes devem possuir densidade relativa similar. A amplitude nos valores de densidade dos ingredientes usados na formulação foi de 1182 kg/m³ entre o menor e maior valor de MEA.

Pelas imagens de microscopia dos ingredientes (Figuras 17 e 18) é possível observar que há diferenças de forma física nas partículas que compuseram a mistura,

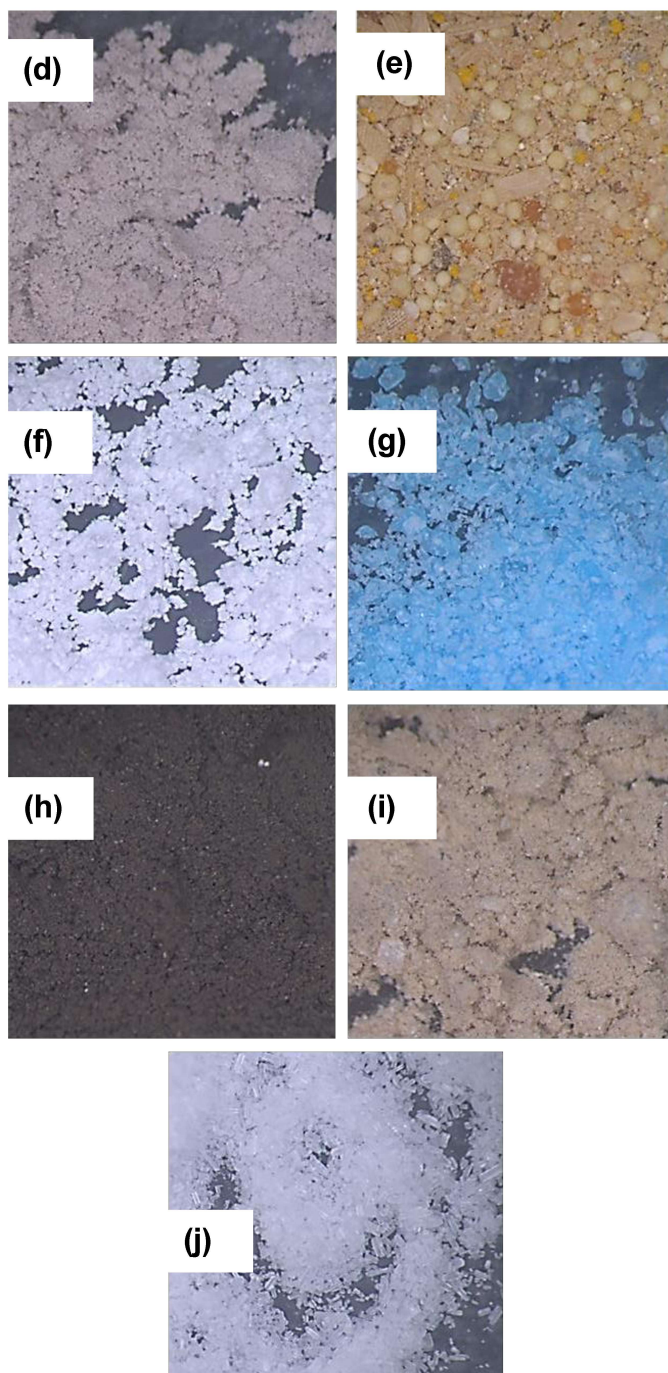
especialmente a casca de arroz com suas partículas laminares, enquanto os minerais apresentam partículas em formatos granulares, variando de angulosos a esféricos.

Figura 17: Imagens de microscopia: (a) Casca de arroz, (b) Calcário calcítico e (c) Caulim.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 18: Imagens de microscopia: (d) Sulfato ferroso (e) Pré-mistura de vitaminas*, (f) Óxido de zinco, (g) Sulfato de cobre, (h) Óxido de manganês, (i) Diluição de iodato de cálcio e (j) Selenito de sódio



*Composta de: Ácido fólico; Pantotenato de cálcio; Biotina; Niacina; Vitamina A; Vitamina B1; Vitamina B12; Vitamina B2; Vitamina B6; Vitamina D3; Vitamina E; Vitamina K; BHA (Butil hidroxianisol); BHT (Hidróxido de tolueno butilado), Etoxiquin; Ácido cítrico; Dióxido de silício; Veículo (16% Caulim, 8% Casca de arroz e 5% Calcário calcítico). Fonte: Autoria própria, 2024.

Com base nos resultados das análises de minerais em todos os ingredientes e considerando o nível de inclusão destes na formulação, foram obtidos os seguintes valores para concentração teórica do produto:

Tabela 8: Concentração teórica (mg/kg) dos minerais utilizados como indicadores para avaliação da homogeneidade da mistura do premix.

Indicadores	Concentração (mg/kg)
Cálcio	49643.00
Cobre	5028.09
Ferro	27568.25
Magnésio	548.10
Manganês	8530.63
Sódio	506.40
Enxofre	17464.70
Selênio	205.37
Zinco	19839.65

Fonte: Autoria própria, 2024.

Embora na composição do premix continha iodato de cálcio, o mineral iodo não foi quantificado com o método analítico utilizado. Do mesmo modo, não foram analisadas as vitaminas que compuseram a pré-mistura.

Tabela 9: Percentual de contribuição de cada ingrediente na concentração dos indicadores minerais analisados no premix.

Ingrediente	Indicadores analisados								
	Ca	Cu	Fe	Mg	Mn	Na	S	Se	Zn
Casca de arroz	2.9	0.1	0.9	61.5	2.6	19.2	1.4	0.1	0.2
Calcário calcítico	90.0	0.0	0.2	4.0	0.1	3.5	0.2	0.0	0.0
Caulim	0.0	0.0	3.9	17.6	0.5	9.6	0.1	0.0	0.0
Sulfato ferroso	0.6	0.3	90.7	2.2	1.7	5.0	82.2	0.0	0.1
Pré-mistura de vitaminas	6.3	0.0	2.1	8.5	0.2	17.7	1.6	0.0	0.0
Óxido de zinco	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.7	0.0	0.0	99.5
Sulfato de cobre	0.0	99.4	0.0	0.1	0.0	1.5	14.3	0.0	0.0
Óxido de manganês	0.1	0.1	1.9	5.3	95.0	19.3	0.2	2.6	0.1
Diluição de iodato de cálcio	0.1	0.0	0.3	0.7	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0
Selenito de sódio	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.9	0.0	97.4	0.0

Fonte: Autoria própria, 2024.

Os resultados da concentração dos minerais, quando avaliados em relação a contribuição relativa de cada ingrediente, são expressos na Tabela 8.

Observa-se que a maioria dos minerais advêm de um único ingrediente como fonte, com mais de 90% de contribuição sobre a concentração, exceto sódio, magnésio e enxofre. Esse é um critério importante na escolha de um indicador para conduzir um teste de homogeneidade de mistura, pois se muitos ingredientes contribuem para sua concentração, não se pode tirar conclusões seguras com base neste (PFOST et al. 1966). Clark et al. (2007) avaliaram uma série de ingredientes como potenciais indicadores de homogeneidade de mistura para rações de aves e, dentre as conclusões, destacaram que a proteína bruta e o fósforo não devem ser considerados indicadores, pois muitos componentes da ração contribuíam em algum nível na concentração desses elementos.

Além do número de ingredientes que contribuem na concentração de um determinado indicador, o nível de inclusão dos ingredientes na formulação deve ser considerado, pois se esses somados representam a maior proporção de uma mistura de multicomponentes, a probabilidade de ocorrência do indicador em todos os pontos da mistura é maior que aqueles ingredientes de menor inclusão, podendo enviesar as conclusões sobre a homogeneidade da mistura.

No presente estudo, o sódio faz parte da composição de todos os ingredientes e sem uma fonte predominante, não sendo um bom indicador individual. O magnésio, apesar de ter a casca de arroz como sua fonte predominante (61,5%), essa representa mais de 50% da formulação, comprometendo assim a sua eleição como indicador da mistura. Já o enxofre é oriundo majoritariamente do sulfato ferroso (82,2%), além do sulfato de cobre, que somados representam 96,5% da concentração do mineral e não ultrapassam 10,25% de inclusão na formulação, portanto, ainda poderia ser eleito um indicador. Os demais minerais analisados atendem aos critérios de fonte majoritária e nível de inclusão como potenciais indicadores de homogeneidade de mistura.

Portanto, com base nos resultados da Tabela 9, serão consideradas nesse estudo as características físicas dos ingredientes fontes dos minerais eleitos como potenciais indicadores individuais (cálcio, cobre, ferro, manganês, enxofre, selênio e zinco), sendo: calcário calcítico, sulfato ferroso, óxido de zinco, sulfato de cobre, óxido

de manganês e selenito de sódio. Tais características dos ingredientes serão relacionadas com o perfil do produto para inferir sobre o desempenho de cada indicador de homogeneidade da mistura.

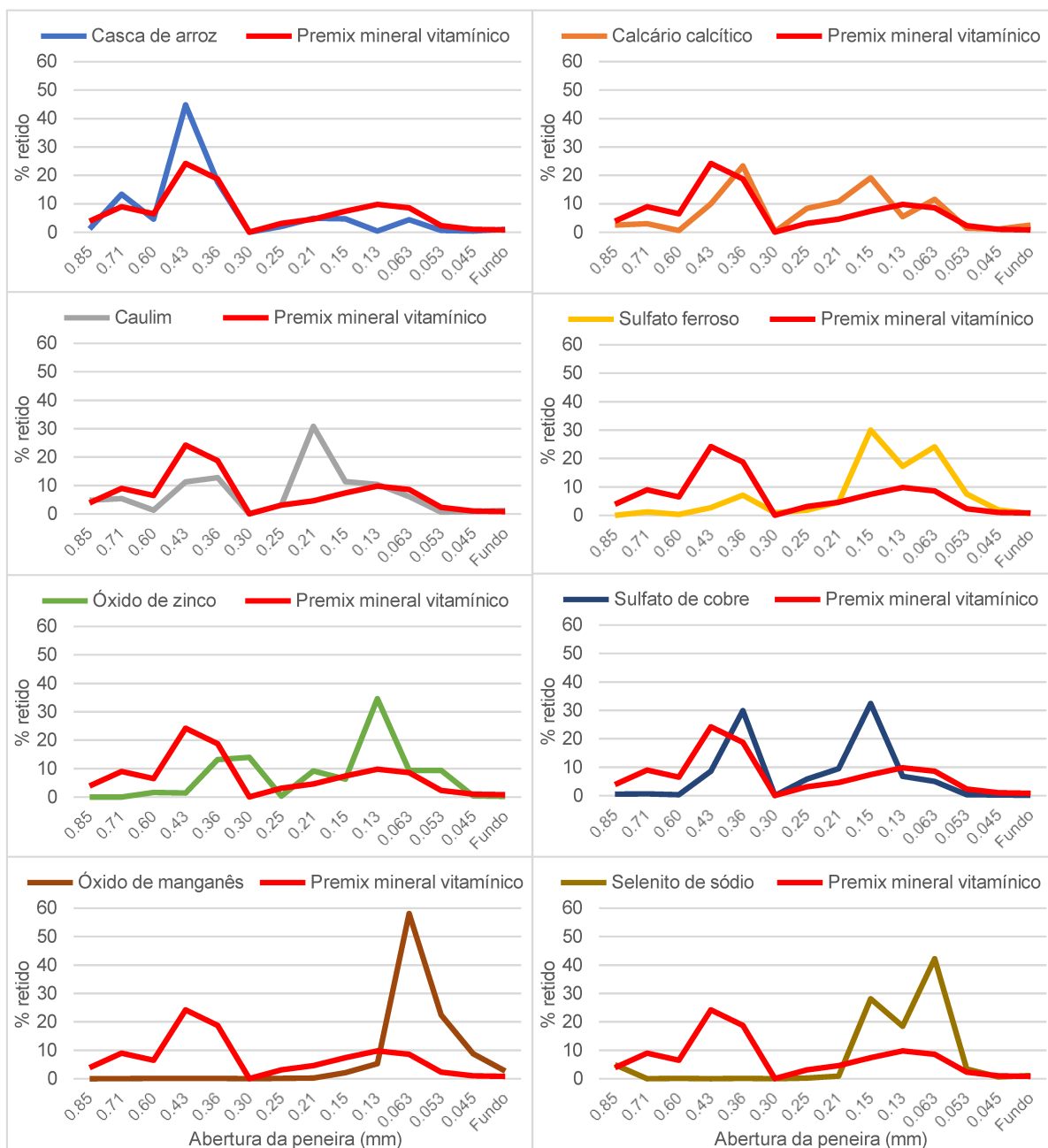
4.2. CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO

O espectro granulométrico do premix comparado com a distribuição de partículas de cada ingrediente fonte dos indicadores individuais, além dos veículos casca de arroz e caulim, é demonstrado na Figura 19.

O perfil de distribuição granulométrico do produto teve forte influência do veículo casca de arroz, já que este compôs mais de 50% da formulação, resultando em 62,25% das partículas da mistura com tamanho superior a 0,36 mm. A casca de arroz moída é um dos ingredientes recomendados como veículo em pré-misturas (ZINN, 1999), especialmente compostas de vitaminas e minerais, e dentre os motivos pode-se de destacar a menor perda de vitaminas por reações de oxirredução com minerais, dada sua composição fibrosa, além do baixo custo, entre outros. A casca de arroz utilizada no estudo foi adquirida de um fornecedor que realiza a moagem com peneira de abertura de 1,4 mm, que resultou em um 81,6% das partículas acima de 0,36 mm.

Analisando os ingredientes fonte dos indicadores minerais, observa-se que o sulfato de cobre e o calcário calcítico apresentaram os maiores valores de retenção de partículas acima de 0,36 mm, sendo de 39,9% e 39,4%, respectivamente. Ao contrário destes, o selenito de sódio e o óxido de manganês apresentaram 5,1% e 0,3%, respectivamente, de partículas retidas acima de 0,36 mm. Considerando que a semelhança entre tamanho de partículas dos ingredientes é uma característica física preponderante para melhorar a qualidade da mistura (AXE, 1995), é esperado que o selênio e o manganês resultem nos maiores valores de CV para um produto com esse perfil de distribuição granulométrico.

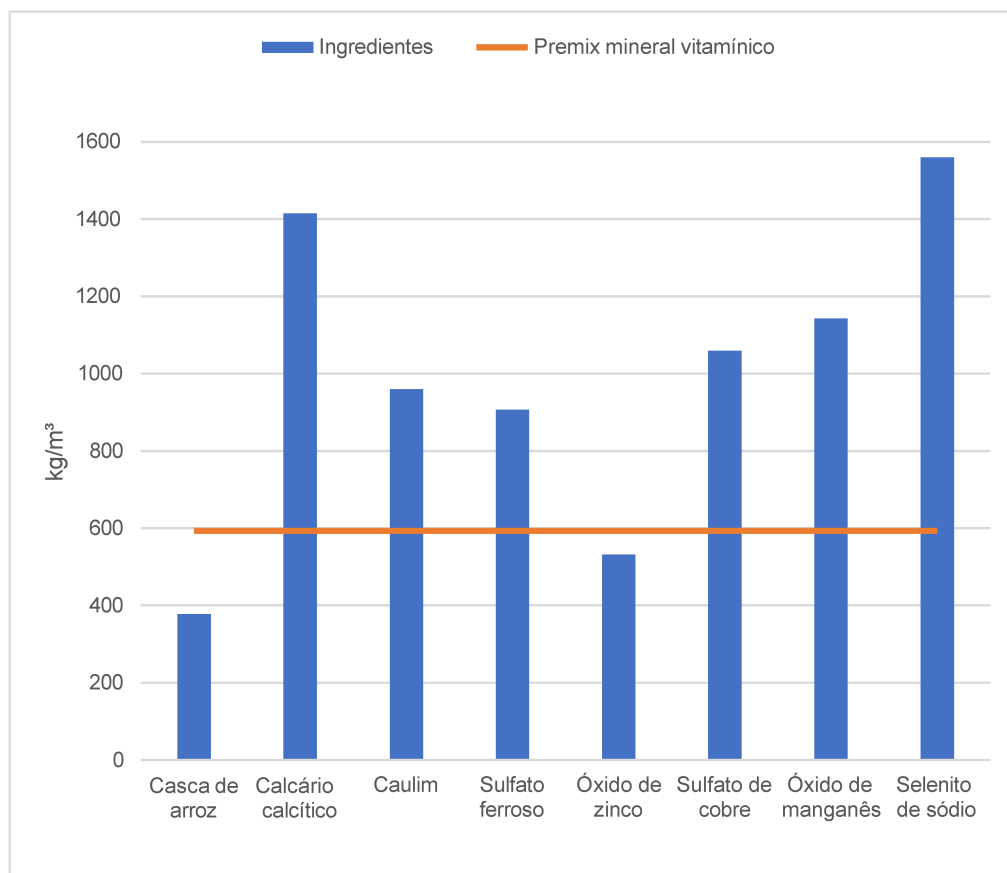
Figura 19: Distribuição granulométrica de partículas do premix em comparação com a distribuição das partículas dos ingredientes fonte dos indicadores e veículos.



Fonte: Autoria própria, 2024.

As diferenças de densidade aparente dos ingredientes em relação ao produto são demonstradas na Figura 20.

Figura 20: Massa específica (kg/m^3) dos ingredientes fonte dos indicadores e veículos em comparação com o premix.



Fonte: Autoria própria, 2024.

O premix teve $593,37 \text{ kg/m}^3$ de densidade aparente, 11% acima do valor teórico formulado ($534,19 \text{ kg/m}^3$). Essa diferença se dá em função da variação que ocorre entre lotes dos ingredientes. Para essa característica física, o óxido de zinco foi o ingrediente fonte de indicador que mais se assemelhou com a composição do produto (-10,4% de variação), enquanto o selenito de sódio e o calcário calcítico apresentaram as maiores diferenças relativas, de 163% e 138%, respectivamente.

Na Figura 21 é possível observar pela imagem ampliada que o produto era heterogêneo também no formato das partículas, com predominância de partículas de casca de arroz, dada sua inclusão.

Figura 21.: Imagem de microscopia do premix utilizado no estudo.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Ao avaliar o impacto de características operacionais e tipos de equipamentos sobre o processo de mistura de uma formulação desafiadora, extrapola-se os resultados e suas implicações para as demais formulações. Ou seja, se em determinado misturador e com determinado volume de ocupação a mistura final pôde ser considerada homogênea para esse tipo de produto, é de se esperar resultados satisfatórios na homogeneização dos demais produtos sob as mesmas condições. Contudo, ainda que o processo de mistura tenha sido eficiente nesse tipo de situação, vale lembrar que as demais etapas do processo de fabricação até o envase do produto, especialmente os mecanismos de transporte e descarga na linha de produção, podem afetar a estabilidade da mistura, gerando a segregação de partículas. Muzzio et al. (1997) destacaram que a simples operação de descarga de uma mistura inicialmente considerada homogênea através de um funil, cujo cone apresentava ângulo de 60° , foi capaz de promover uma extensa segregação de partículas de tamanhos diferentes ao fluírem através do dispositivo de descarga. Portanto, os resultados de avaliação da homogeneidade de mistura nos diferentes misturadores e com diferentes volumes de ocupação obtidos nesse trabalho não podem ser extrapolados para a homogeneidade do produto final, dadas as características das linhas de produção (Item 3.1.) e do produto.

4.3. VOLUME MÍNIMO DE OCUPAÇÃO DO MISTURADOR COM BASE NA HOMOGENEIDADE DA MISTURA

Os resultados de CV obtidos a partir das análises de minerais para os volumes úteis teóricos de 10%, 30%, 50%, 70% e 90% de ocupação nos misturadores de pás e helicoidal são expressos nas Tabelas 9 e 10, respectivamente.

Tabela 10: Coeficientes de variação (%) da mistura do premix mineral vitamínico produzido em misturador de pás.

Indicadores	Volume útil (%)					Média	EPM	P-Valor	
	10	30	50	70	90			Lin	Quad
Cálcio	5,40	4,83	4,52	6,01	5,09	5,17	0,2552	0,8456	0,7432
Cobre	5,65	6,11	4,64	6,74	4,31	5,49	0,4521	0,5317	0,5682
Ferro	6,33	5,98	4,71	5,16	4,46	5,33	0,3600	0,1745	0,7929
Magnésio	6,18	4,71	6,15	4,44	4,95	5,29	0,3678	0,3327	0,8028
Manganês	5,93	7,01	5,70	7,48	4,79	6,18	0,4798	0,6266	0,3179
Sódio	7,02	6,68	4,63	6,64	6,36	6,27	0,4222	0,7226	0,3676
Enxofre	5,53	5,89	4,46	4,95	4,45	5,06	0,2876	0,3132	0,9553
Selênio	6,70	6,84	9,15	8,89	5,60	7,44	0,6826	0,9719	0,0800
Zinco	9,52	5,17	4,87	5,75	5,58	6,18	0,8496	0,1644	0,1282
Indicador Composto	6,47	5,91	5,42	6,23	5,06	5,82	0,2585	0,2878	0,9774

Fonte: Autoria própria, 2024.

No misturador de pás não foi observado efeito ($P > 0.05$) do volume de ocupação nos resultados de CV para nenhum dos indicadores avaliados. Ainda, independentemente do volume de ocupação do misturador, todos os elementos minerais resultaram em um CV inferior a 10%, atendendo ao critério definido para atestar que a mistura foi homogênea.

No misturador helicoidal foi observado efeito quadrático ($P \leq 0,05$) para o volume ocupado pela mistura no vaso do misturador para cobre, ferro, manganês, enxofre e indicador composto. Para esses indicadores, houve uma melhoria nos resultados de CV à medida que se aumentou o volume de ocupação do misturador, atingindo os menores resultados na faixa intermediária de ocupação, com 55% a 65% do volume útil (Tabela 11), voltando a subir com o aumento do volume ocupado. Para sódio, selênio e zinco foi observado efeito linear ($P \leq 0,05$), com diminuição do CV da mistura à medida que se aumentou o volume de ocupação do misturador. Não foi observado

efeito ($P > 0,05$) do volume de ocupação sobre os resultados de CV apenas para cálcio e magnésio.

Tabela 11: Coeficientes de variação (%) da mistura do premix mineral vitamínico produzido em misturador helicoidal.

Indicadores	Volume útil (%)					Média	EPM	P-Valor	
	10	30	50	70	90			Lin	Quad
Cálcio	5,45	4,16	3,91	3,35	4,16	4,21	0,3444	0,0518	0,0574
Cobre	6,52	3,28	3,81	3,24	4,24	4,22	0,6043	0,0565	0,0282
Ferro	7,18	3,19	3,11	3,49	3,62	4,12	0,7712	0,0040	0,0024
Magnésio	6,38	5,56	6,18	4,60	4,05	5,35	0,4498	0,0952	0,6587
Manganês	7,47	4,02	4,80	4,21	5,63	5,23	0,6272	0,1008	0,0035
Sódio	10,60	6,98	6,41	5,84	5,39	7,04	0,9283	0,0105	0,1853
Enxofre	6,73	4,02	3,95	4,18	4,57	4,69	0,5212	0,0705	0,0225
Selênio	8,57	7,50	5,34	4,98	5,32	6,34	0,7144	0,0299	0,2583
Zinco	8,31	6,13	4,54	4,76	4,24	5,60	0,7518	0,0030	0,1160
Indicador Composto	7,45	4,98	4,68	4,29	4,60	5,20	0,5731	<0,0001	0,0008

Fonte: Autoria própria, 2024.

De todos os indicadores avaliados cujo CV foi afetado significativamente pelo volume ocupado no misturador helicoidal, os maiores resultados foram obtidos com 10% volume de ocupação, ainda que o CV tenha sido inferior a 10% para todos os minerais, exceto para o sódio. As equações que melhor descrevem o comportamento do CV desses minerais na mistura estão descritas na Tabela 11.

Tabela 12: Modelos de regressão polinomial para coeficiente de variação da mistura (y) em função do volume de ocupação (x) do misturador helicoidal.

Indicadores	Equação	R ²	Ponto de inflexão*
Cu	$y = 0,0013x^2 - 0,1548x + 7,6084$	0,8225	59,54
Fe	$y = 0,0016x^2 - 0,1895x + 8,4641$	0,8455	59,22
Mn	$y = 0,0015x^2 - 0,1669x + 8,6394$	0,7909	55,63
Na	$y = -0,0578x + 9,934$	0,7753	-
S	$y = 0,0012x^2 - 0,1369x + 7,7032$	0,8741	57,04
Se	$y = -0,0451x + 8,597$	0,7970	-
Zn	$y = -0,0476x + 7,9735$	0,8001	-
Indicador Composto	$y = 0,001x^2 - 0,1296x + 8,458$	0,9469	64,80

*Valor de x que resulta no menor valor de y, onde $x = -b/2a$. Fonte: Autoria própria, 2024.

Conforme detalhado nos resultados de caracterização dos ingredientes e da formulação (item 4.1.), de todos os minerais analisados, a avaliação individual dos resultados de CV para sódio e magnésio deve ser vista com cautela, dado que ambos não respeitaram os critérios de eleição como indicador ideal em função de seus ingredientes fontes nesse produto. Além dos resultados de CV expressos para cada mineral, foi utilizada a média de CV de todos os minerais analisados para compor um “indicador composto”. A ideia desse indicador é que, ao invés de escolher um único elemento, possa se ter uma avaliação ampliada da condição geral da mistura.

Clark, Behnke e Poole. (2007) destacaram nas conclusões de suas pesquisas que os resultados de um teste de homogeneidade de mistura podem ser influenciados pelo indicador específico escolhido para a análise. De modo geral, ao selecionar um indicador para testar a homogeneidade da mistura, deve-se considerar as características do mesmo, sendo preferencialmente de fonte única e de um ingrediente comum, além dos fatores analíticos, como precisão do ensaio laboratorial, facilidade de análise e custo. Por isso não há um indicador ideal definido a ser utilizado, devendo ser analisado cada caso, considerando ainda a finalidade do produto e os objetivos do teste.

Pfost et al. (1970) detalharam uma série de características a serem consideradas para escolha de um indicador, sendo: 1) evitar a seleção de indicadores cuja variação não comprometa de forma significativa o desempenho animal; 2) selecionar ingredientes com propriedades físicas semelhantes, especialmente tamanho de partículas e densidade; 3) não utilizar como indicador componentes do produto que todos ou quase todos os ingredientes contenham (como exemplo, o sódio do presente estudo); 4) considerar a variação analítica do elemento a ser analisado, baseada na sua concentração e no método empregado, devendo ser menor que a variação admitida para o teste do misturador; 5) que determinados aditivos, como medicamentos e outras substâncias, podem ser bons indicadores, visto que o grau de mistura é importante do ponto de vista legal e de desempenho animal; e 6) que elementos minerais podem ser bons indicadores devido à densidade e ao tamanho das partículas; no entanto, os elevados custos dos ensaios podem ser limitantes.

Atualmente a análise de minerais por Espectrometria de Massa por Plasma (ICP) está se tornando cada vez mais comum em laboratórios de alimentos e rações.

Essa tecnologia apresenta várias vantagens, incluindo a capacidade de medir diversos elementos simultaneamente, com limites de detecção muito baixos, oferecendo uma faixa dinâmica linear mais ampla que permite a determinação de elementos importantes e traço na mesma análise (VASSILEVA; HOENIG, 2011). Dada a aplicação dessa técnica no presente estudo e o interesse de avaliar a mistura como um todo, não somente baseada em um único mineral, o indicador composto pela média do CV de todos os minerais foi eleito o indicador de predileção para considerações sobre a homogeneidade da mistura.

Com base nos resultados da Tabela 10 e aplicando as equações da Tabela 11, é possível observar que para os indicadores minerais analisados e, conseqüentemente, para o indicador composto, foram obtidos os maiores valores de CV com 10% de volume de ocupação no misturador helicoidal. Para ferro e para o indicador composto, por exemplo, o CV obtido com 10% de volume de ocupação foi de 7,18% e 7,45%, respectivamente; no entanto, quando considerado o volume de ocupação resultante do ponto de inflexão das respectivas equações de regressão, sendo de 59% para ferro e de 65% para o indicador composto, o CV estimado cai para 2,85% e 4,26%, respectivamente. Tais resultados concordam com a literatura que descreve que o volume de ocupação exerce influência sobre a qualidade da mistura (TOSO; MORABITO, 2005; ZINN, 1999). Apesar do impacto do volume de ocupação no misturador helicoidal sobre o CV da mistura, ainda assim o critério de decisão definido para sua qualidade ($CV \leq 10\%$) foi atendido. Adicionalmente, levando em consideração as distintas características físicas dos ingredientes que compuseram a formulação do produto, tornando-o desafiador para o processo de homogeneização, o desempenho de ambos os equipamentos foi satisfatório nas distintas condições operacionais relacionadas ao tamanho da batelada.

É difícil explicar por que a qualidade da mistura obtida no misturador de pás não foi influenciada pelo seu volume de ocupação, enquanto o misturador com helicoides teve a grande maioria dos indicadores de CV afetados por essa variável. As explicações podem estar relacionadas à geometria dos equipamentos e de seus impelidores, bem como o nível de desgaste, que poderiam justificar a presença de pontos de estagnação de produto, cujo impacto supostamente tenha sido maior no misturador helicoidal quando continha menor volume de ocupação em seu vaso. Outro

fator a ser considerado é o ponto de amostragem, pois no misturador helicoidal as amostras foram colhidas diretamente do seu interior, enquanto no misturador de pás o produto foi liberado para o compartimento de pós mistura, com abertura de válvula e queda livre, sendo movido em transportador de arraste por uma corrente de 5,2 metros de comprimento total de uma extremidade à outra para então ser colhidas as amostras. Contudo, acreditamos que esse fator (queda e arraste) não seria capaz de causar um significativo distúrbio na condição de mistura do produto, causando viés na avaliação, porém não é descartado.

Embora o volume de ocupação do misturador de pás não exerceu influência sobre a qualidade da mistura, os resultados de CV foram, de modo geral, superiores aos obtidos no misturador helicoidal, excetuando no volume de 10% de ocupação. A comparação de desempenho entre misturadores é apresentada na próxima seção.

Do ponto de vista prático, tais resultados trazem importantes implicações para os processos de mistura em uma fábrica de ração, podendo ser reduzido o volume de ocupação dos misturadores em situações específicas, sem comprometimentos significativos à qualidade ou, ainda que significativos, atendendo aos parâmetros de qualidade preconizados.

4.4. AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA HOMOGENEIDADE DA MISTURA ENTRE MISTURADOR HELICOIDAL E DE PÁS

Os resultados obtidos a partir da ANOVA, apresentados na Tabela 12, demonstram efeito da interação ($P \leq 0,05$) entre tipo de misturador e volume de ocupação para manganês e selênio. Avaliando os fatores isoladamente, o tipo de misturador apresentou diferença estatística para cálcio, cobre e ferro ($P \leq 0,05$). Para volume de ocupação, foi observado comportamento linear ($P \leq 0,05$) para ferro, sódio e indicador composto; enquanto o zinco apresentou efeito quadrático ($P \leq 0,05$). Embora ferro e zinco foram significativos para ambos os modelos, linear e quadrático, a análise de falta de ajuste foi significativa apenas para zinco ($P=0,0543$ e $P=0,0286$, respectivamente), optando-se pelo modelo quadrático para explicar o comportamento do CV desse mineral.

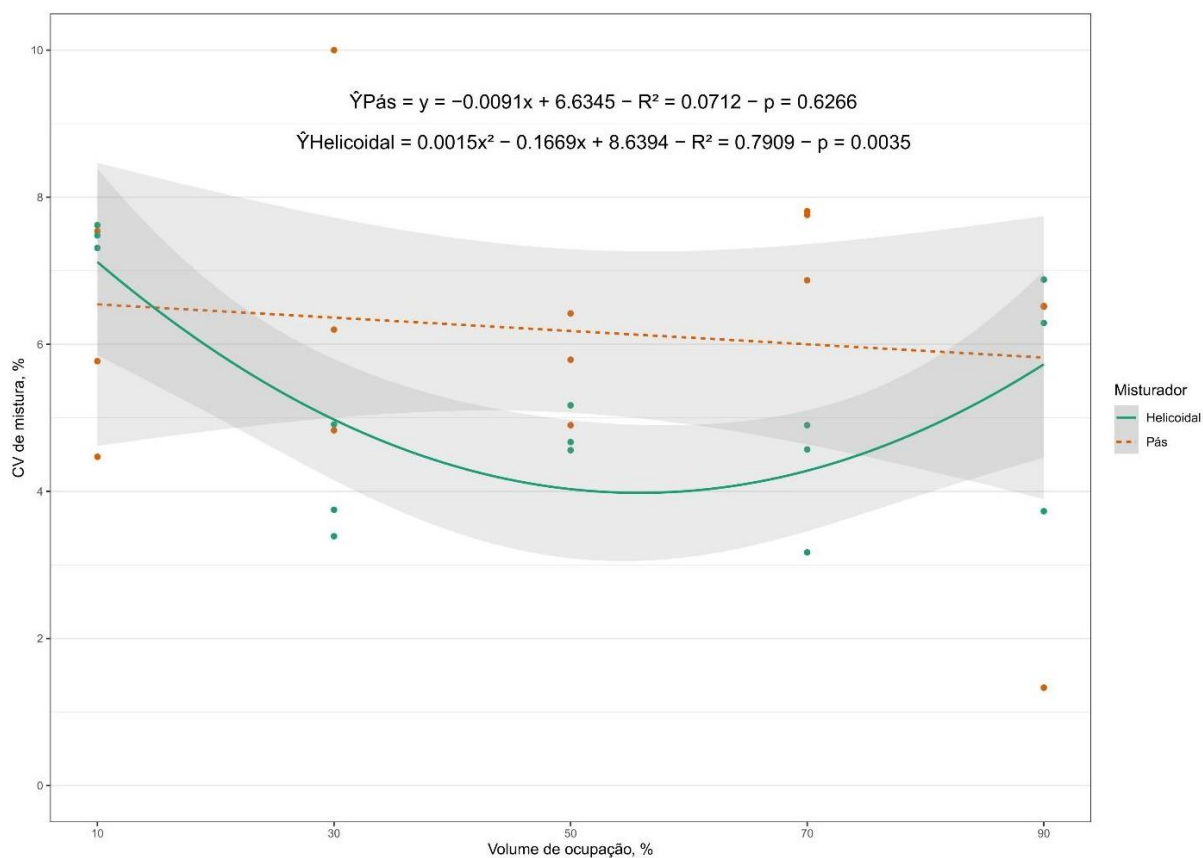
Tabela 13: Significância de valores da ANOVA, considerando os fatores tipo de misturador, volume de ocupação e a interação entre eles.

Indicadores	<i>P</i> -Valor				
	Misturador	Volume		Misturador*Volume	
		Lin	Quad	Lin	Quad
Cálcio	0.0434	0.3864	0.1992	0.2308	0.4694
Cobre	0.0355	0.0946	0.3205	0.4646	0.0583
Ferro	0.0296	0.0052	0.0363	0.5498	0.0914
Magnésio	0.9056	0.0538	0.8639	0.4902	0.6154
Manganês	0.1143	0.2116	0.4307	0.6894	0.0145
Sódio	0.3155	0.0240	0.1104	0.0696	0.7351
Enxofre	0.4808	0.0560	0.1311	0.7729	0.1546
Selênio	0.1137	0.1518	0.3471	0.1527	0.0378
Zinco	0.4658	0.0059	0.0352	0.6958	0.5106
Indicador Composto	0.0895	0.0015	0.6923	0.1287	0.0767

Fonte: Autoria própria, 2024.

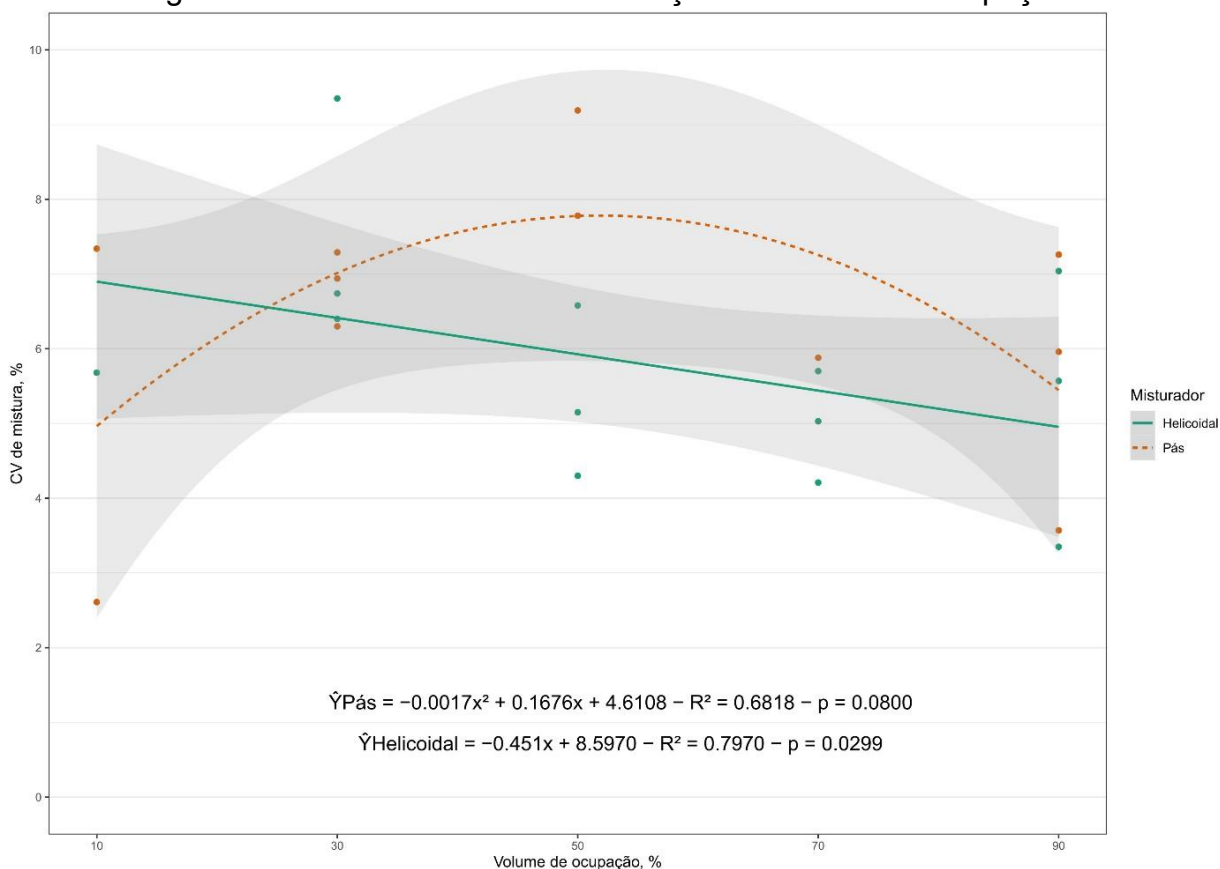
O comportamento do CV para manganês e selênio na mistura é dependente do tipo de misturador e do seu volume de ocupação. Para o manganês, o comportamento do CV no misturador helicoidal é quadrático para volume de ocupação ($P=0,0035$; Tabela 10), com os menores resultados nos níveis intermediários, contrário aos resultados observados no misturador de pás (Figura 22). Para o selênio, à medida que aumenta o volume de ocupação no misturador helicoidal o CV diminui ($P=0,0299$; Tabela 10), enquanto no misturador de pás houve tendência de comportamento quadrático ($P=0,08$; Tabela 9), com os maiores resultados de CV nos volumes de 50% e 70% de ocupação, fazendo com que as curvas das equações se cruzassem (Figura 23). Do ponto de vista prático, é difícil explicar essa interação, apesar de que em ambos os misturadores o CV para manganês e selênio ficou abaixo de 10%, independentemente do volume de ocupação, o que atesta a homogeneidade da mistura desses elementos.

Figura 22: Interação para CV de manganês demonstrado a partir dos modelos de regressão de cada misturador em função do volume de ocupação.



Fonte: Autoria própria, 2024.

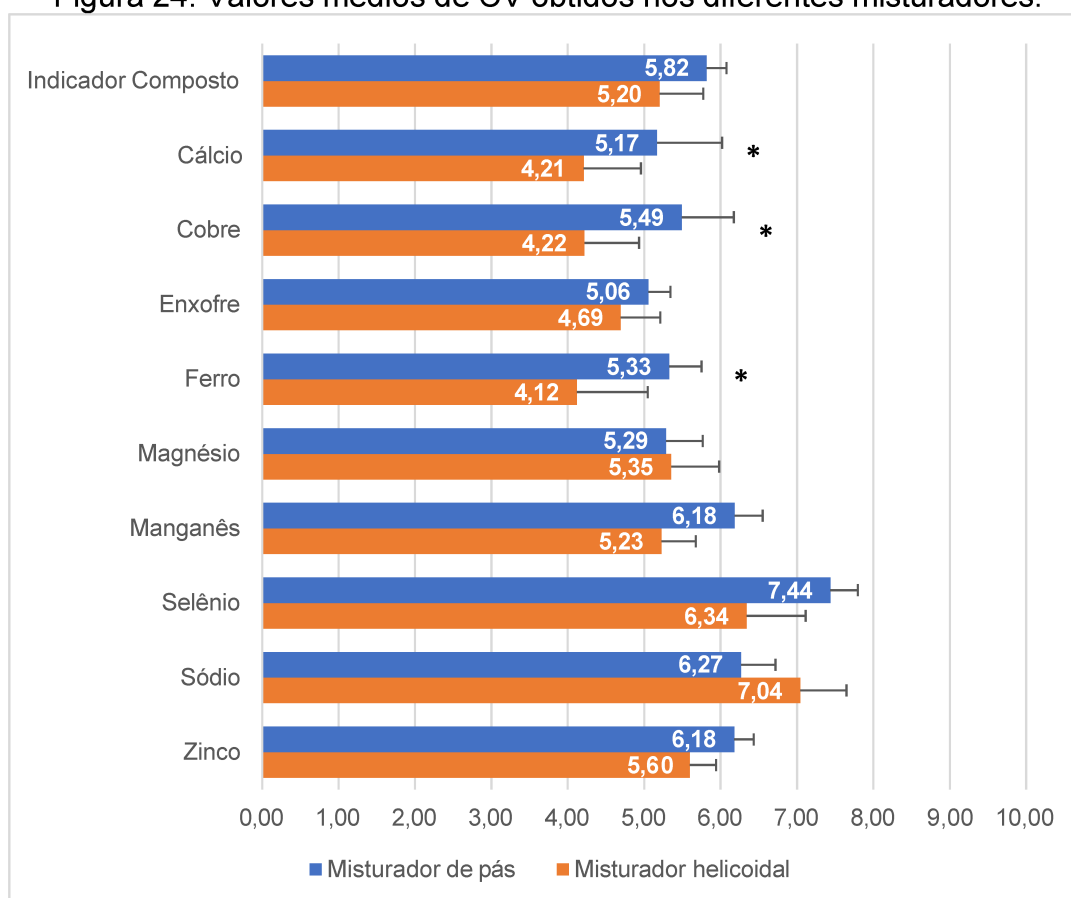
Figura 23: Interação para CV de selênio demonstrado a partir dos modelos de regressão de cada misturador em função do volume de ocupação.



Fonte: Autoria própria, 2024.

O tipo de misturador teve influência significativa para cálcio, cobre e ferro ($P \leq 0,05$), com os menores valores de CV obtidos no misturador helicoidal em comparação com o misturador de pás (Figura 24). Apesar de não ter havido diferença significativa para os demais indicadores, excetuando o magnésio e o sódio que, inclusive, não foram considerados indicadores individuais confiáveis nesse estudo, observa-se menores valores numéricos de CV no misturador helicoidal. Não encontramos explicações que justifiquem o melhor desempenho do misturador helicoidal comparado ao misturador de pás. Uma possível explicação poderia estar relacionada ao grau de desgaste e limpeza dos equipamentos, visto que são fatores que afetam a homogeneidade da mistura (CLARK; BEHNKE; POOLE, 2007). No entanto, no caso da empresa em questão, são adotados procedimentos de manutenção preventiva e de limpeza que asseguram as boas condições dos equipamentos para suas operações. Outra possível explicação pode estar relacionada à configuração dos equipamentos, sendo distinta entre fabricantes.

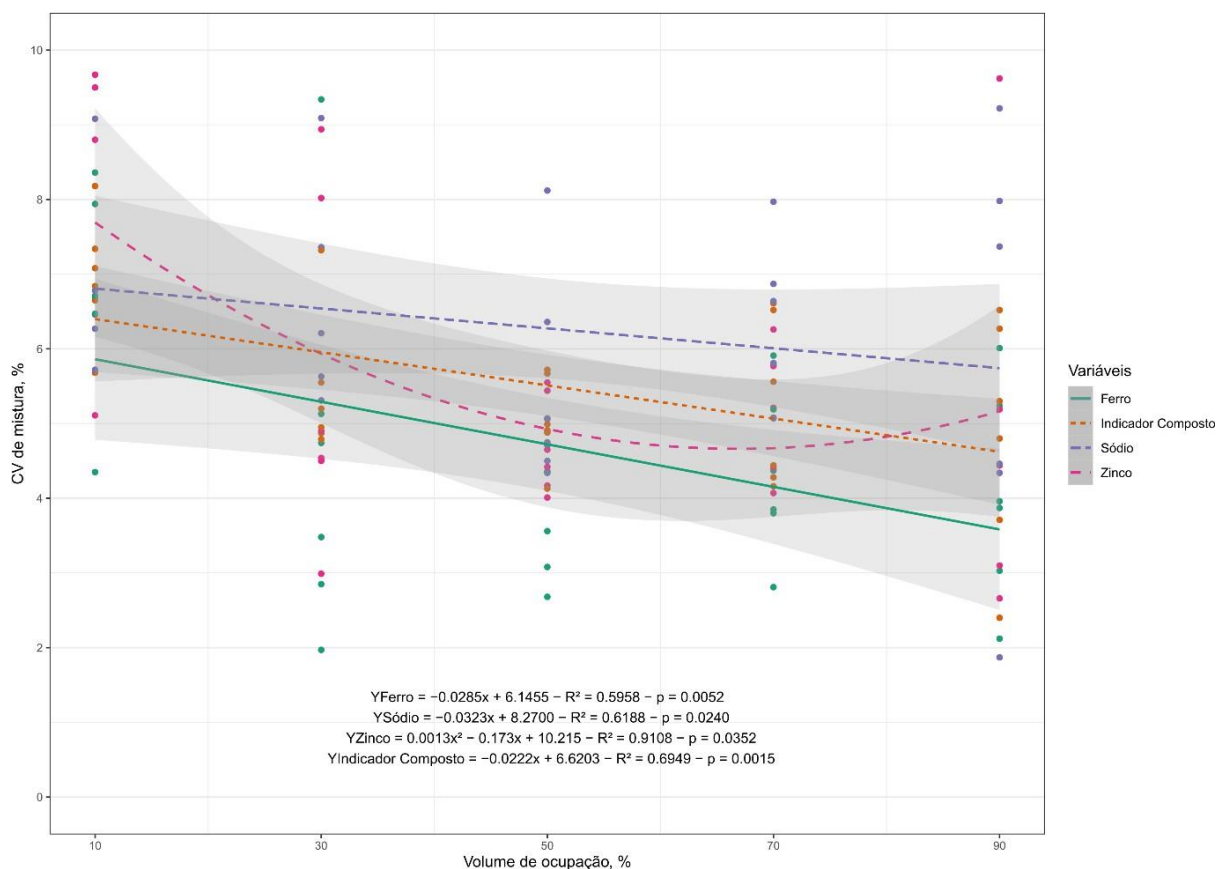
Figura 24: Valores médios de CV obtidos nos diferentes misturadores.



* Significativo com $P \leq 0,05$ de probabilidade de erro. Fonte: Autoria própria, 2024.

Quando os resultados de CV em função do volume de ocupação foram avaliados conjuntamente, independentemente do tipo de misturador (detalhados no item 4.3.), foi observado comportamento linear ($P \leq 0,05$) para ferro, sódio e indicador composto, com redução do CV da mistura à medida que foi aumentado o volume de ocupação dos misturadores (Figura 25). Para zinco, o resultado de CV foi quadrático ($P \leq 0,05$), demonstrando os melhores resultados nos volumes intermediários de ocupação dos misturadores, com CV podendo chegar a 4,45% no volume de 66,5% de ocupação, segundo estimativa dada pela equação de regressão (Figura 25).

Figura 25: Equações de regressão significativas para volume de ocupação do misturador.



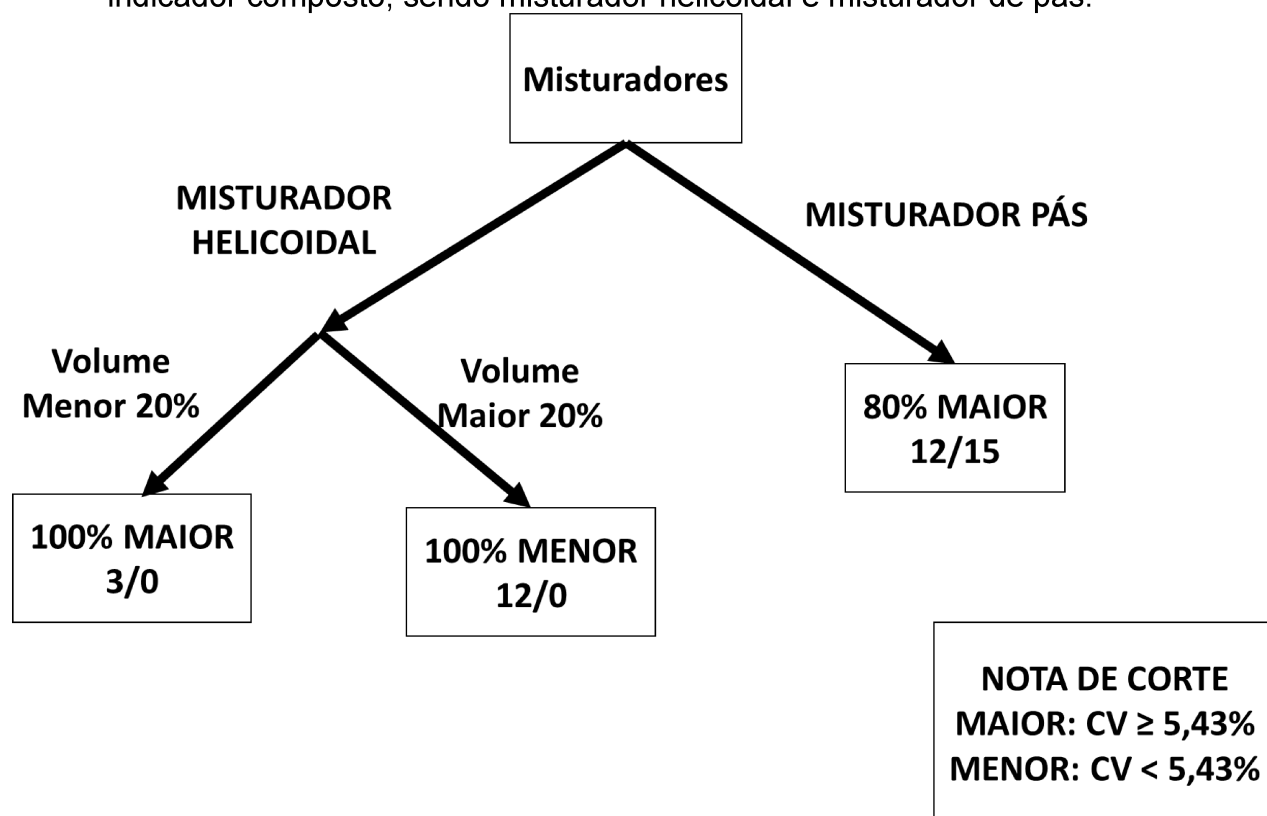
Fonte: Autoria própria, 2024.

4.5. RESPOSTAS A PARTIR DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA A MÁXIMA HOMOGENEIDADE DA MISTURA

Com o objetivo de identificar os melhores resultados que permitem o gestor tomar uma decisão sobre qual misturador e qual volume será usado, aplicou-se a análise de *Machine Learning* como ferramenta de inteligência artificial para avaliação dos dados de CV a partir do indicador composto, foi obtido uma árvore decisória com 90% de assertividade, indicando a combinação de fatores que resultam nos menores valores de CV, considerando como critério de classificação dos resultados a sua mediana (CV de 5,43%). Aqueles experimentos que tiveram coeficiente de variação composto acima da mediana foram categorizados como ALTO, enquanto aqueles que apresentaram resultado abaixo de 5,43 foram categorizados como BAIXO. O uso da

mediana como limiar é realizado para que ambos os grupos (ALTO e BAIXO) tenham o mesmo número de ocorrências. Tais resultados estão expressos na Figura 27.

Figura 22: Árvore decisória dos fatores que influenciam o CV da mistura, baseado no indicador composto, sendo misturador helicoidal e misturador de pás.

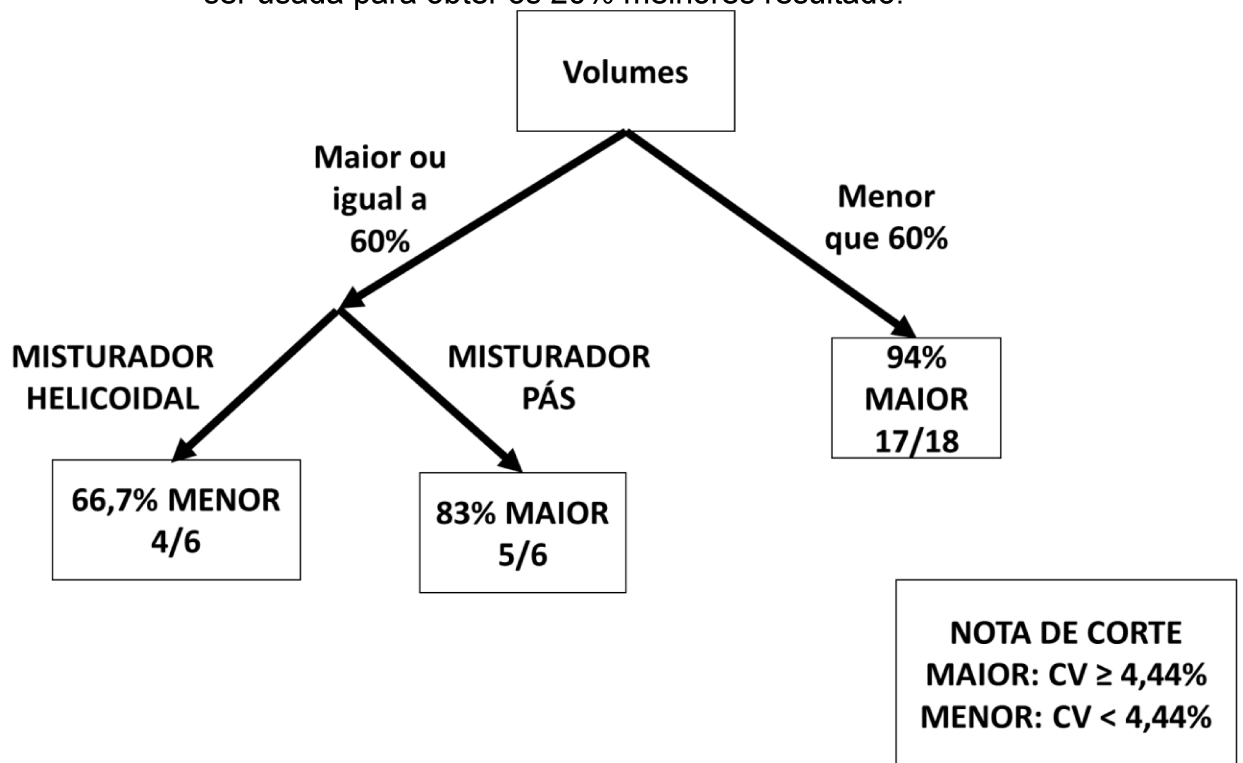


Fonte: Autoria própria, 2024.

Observa-se que o fator preponderante para obtenção dos melhores resultados de CV é o tipo de misturador, representado no primeiro nó da árvore de decisão. No misturador de pás, independentemente do volume, 80% dos resultados foram classificados como altos (CV > 5,43). Já para o misturador helicoidal, quando o seu volume de ocupação foi igual ou superior a 20%, 80% dos resultados de CV foram classificados como baixos (CV < 5,43). Estes resultados demonstram maior eficiência de mistura do misturador helicoidal em relação ao misturador de pás para o produto testado, desde que respeitado um volume útil mínimo de ocupação de 20%.

Em outra análise, com intuito de encontrar os 20% dos melhores resultados de mistura utilizando os dois reatores foi realizada o fator de corte no valor de CV igual a 4,44%. Assim, a árvore de decisão gerada é mostrada na Figura 28.

Figura 23: Árvore decisória para determinação de qual volume e unidade produtiva a ser usada para obter os 20% melhores resultado.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Isso leva a uma distribuição de 24 classificações ALTO e apenas 6 classificações BAIXO para os 30 experimentos. Observa-se que nesse caso o fator preponderante é o volume. Quando o volume é menor que 60%, 94% (17 de 18) dos experimentos tiveram valores de CV composto acima de 4,44%, resultando na classificação ALTO. Por outro lado, quando o volume era maior ou igual à 60%, o fator de decisão é o tipo de misturador. Quando o misturador foi o helicoidal, 66,6% (4 de 6) dos experimentos tiveram classificação BAIXO, ou seja, alcançaram resultados de CV composto abaixo de 4,44%. Já quando o misturador foi o de pás, 83,3% (5 de 6) dos resultados foram ALTO, o que indica que o misturador de pás quase sempre produz resultados de CV composto acima de 4,44%. Assim, essa árvore de decisão indica que os melhores resultados em termos de homogeneização acontecem quando o misturador helicoidal é utilizado com volume acima de 60%.

4.6. O COMPORTAMENTO DO CV EM FUNÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS INGREDIENTES DA MISTURA

A partir dos resultados médios de CV obtidos para os diferentes indicadores individuais utilizados no presente estudo e considerando a avaliação das características físicas dos ingredientes fonte dos minerais indicadores (item 4.1.) e do produto (item 4.2.), foi elaborada a Tabela 13, que ranqueia os resultados para estabelecimento de relação entre as variáveis. Foram excluídos dessa avaliação os minerais sódio e magnésio, em virtude de não terem atendido os requisitos de indicador ideal, conforme exposto no item 4.2.

É possível observar que os melhores resultados de CV (abaixo de 5%) foram obtidos para cálcio, ferro, cobre e enxofre, respectivamente. Em contrapartida, os maiores resultados (acima de 5%) foram observados para selênio, zinco e manganês, nesta ordem.

Tabela 14: Rankings dos indicadores utilizados no estudo a partir dos resultados de CV e das características físicas dos ingredientes e do produto

Indicadores	Ingrediente majoritário	CV médio	Ran-king	Teor (mg/kg)	Ran-king	Inclusão (%)	Ran-king	% var. DGM alvo*	Ran-king	% var. MEA alvo**	Ran-king
Cálcio	Calcário calcítico	4.69	1º	49643.00	1º	11.61	1º	-25.12	2º	138.4	5º
Ferro	Sulfato ferroso	4.72	2º	27568.25	2º	8.25	3º	-53.60	4º	52.8	2º
Cobre	Sulfato de cobre	4.85	3º	5028.09	6º	2.00	5º	-21.28	1º	78.5	3º
Enxofre	Sulfato ferroso/ Sulfato de cobre	4.87	4º	17464.70	4º	10.25	2º		4º / 1º		2º / 4º
Manganês	Óxido de manganês	5.70	5º	8530.63	5º	1.50	6º	-75.04	6º	92.6	4º
Zinco	Óxido de zinco	5.89	6º	19839.65	3º	2.50	4º	-44.64	3º	-10.4	1º
Selênio	Selenito de sódio	6.89	7º	205.37	7º	0.04	7º	-60.32	5º	162.9	6º

* % de variação em relação ao DGM alvo, de 313 µm (referente a análise do premix); ** % de variação em relação a MEA alvo, de 593.3 kg/m³ (referente a análise do premix)

Quando se estabelece relação com o teor dos minerais na mistura, é possível observar que justamente o cálcio e o ferro, ranqueados em 1º e 2º lugar para melhores CV, respectivamente, são os elementos de maior concentração, assim como o selênio que teve o pior resultado de CV foi o elemento com menor teor na mistura, indicando que a concentração do mineral tem forte influência sobre seu desempenho em um teste de homogeneidade de mistura. Isso tem relação com a variação do método analítico, pois quanto menor a concentração de determinada substância, maior o erro analítico admitido (AOAC, 2002). Ainda, o teor pode estar relacionado com o nível de inclusão do ingrediente fonte na mistura, a depender da concentração da substância no próprio ingrediente. Mais uma vez, avaliando o nível de inclusão do ingrediente fonte do mineral na mistura, o cálcio e o ferro tiveram as maiores inclusões individuais e o selênio a menor inclusão via selenito de sódio, estando de acordo com os resultados de CV. Para nível de inclusão do ingrediente, após o cálcio, o enxofre ocupou a 2ª posição, em virtude de ser oriundo de não apenas um, mas de dois ingredientes (sulfato ferroso + sulfato de cobre), que somados representaram inclusão de 10,25%, seguido do ferro oriundo majoritariamente do sulfato ferroso. Quanto maior a inclusão de um ingrediente na formulação, maior a facilidade de dispersão no mesmo na mistura (ZINN, 1999).

O cobre, apesar de ter resultado no 3º melhor CV médio, não apresentou os maiores teores do elemento e maior inclusão do ingrediente na mistura, ocupando a penúltima e antepenúltima posição no ranking dessas características, respectivamente. No entanto, quando avaliada a diferença do diâmetro geométrico médio de suas partículas em relação ao DGM do produto, este teve o melhor desempenho, seguido do cálcio, indicando que o tamanho das partículas é a característica física crucial dos ingredientes para homogeneidade da mistura, conforme destaca a literatura (AXE, 1995).

A densidade relativa do ingrediente parece ter menor impacto que o tamanho das partículas para o processo de homogeneização, visto que o cálcio teve o penúltimo pior resultado no ranking dessa característica, com uma diferença expressiva em relação a MEA do produto (821 kg/m³ de diferença), mas com o 2º resultado de DGM mais próximo do produto. Não se pode desconsiderar que o nível de concentração do cálcio e de inclusão do calcário calcítico foram os maiores,

conforme já mencionado, logo o resultado do CV do elemento é oriundo da combinação desses fatores, não sendo possível medir com exatidão o grau de influência individual de cada característica.

Em relação ao zinco, vale destacar que embora tenha apresentado a menor variação de MEA do seu ingrediente fonte em relação ao produto e a 3ª menor variação de DGM alvo, assim como o 3ª maior teor do elemento no ranking, o óxido de zinco possui como característica física alta adesividade ou coesão, especialmente às superfícies dos equipamentos da linha de produção. Não foi medida essa característica nos ingredientes no presente estudo, porém foi possível observar na prática a adesão que as partículas do óxido de zinco resultaram nas paredes do equipamento de dosagem e transporte durante a condução do experimento fabril. Isso pode explicar o resultado médio de CV obtido na mistura para esse indicador, tendo sido o 2º pior após o selênio. Halidan et al. (2018) observaram que partículas coesivas apresentam maiores desafios para homogeneização em misturas binárias, sugerindo uma limitação do impulsor de pás do equipamento para materiais coesivos.

Observa-se na prática que o manganês é um elemento muito utilizado como indicador de homogeneidade de mistura nos testes conduzidos pelas empresas fabricantes de produtos para alimentação animal. Dentre as justificativas, destaca-se: o elevado número de partículas por unidade de massa do óxido de manganês, em função do seu baixo DGM, o que favorece a sua dispersão nas misturas (ZINN, 1999) não possuir altas concentrações contaminantes nos demais ingredientes e, portanto, ser oriundo de uma fonte majoritária, normalmente, óxido ou sulfato de manganês; e baixa variação analítica. Contudo, no presente estudo o manganês apresentou o penúltimo pior resultado no ranking de CV médio, depois do zinco e do selênio, respectivamente. Isso pode ter ocorrido em virtude de ter apresentado o terceiro menor teor e o segundo menor nível de inclusão do ingrediente na mistura e, especialmente, por ter a maior variação de DGM em relação ao produto (Figura 19 do item 4.2.), com uma diferença significativa comparada à casca de arroz utilizada como veículo.

Tal característica deve ter sido preponderante para a percolação das partículas do óxido de manganês na mistura. Segundo Zinn (1999) os veículos das misturas são definidos como ingredientes que devem se combinar aos microingredientes da pré-

mistura para alterar suas características físicas, onde ao serem adsorvidos, as partículas muito finas dos microingredientes podem se mover mais rápida e uniformemente pela mistura de uma ração, composta majoritariamente por grãos moídos e farelos de sementes de oleaginosas. No entanto, o mesmo autor destaca que as propriedades adsortivas de grãos moídos e farelos vegetais são baixas, mas que essa limitação pode ser superada adicionando em torno de 2% de alguma fonte de óleo ao veículo, formando uma fina película de gordura adesiva sobre suas partículas. No presente estudo o óleo não foi adicionado ao veículo, pois a ideia era promover esse desafio e avaliar seu impacto sobre o CV.

Por fim, o maior resultado de CV para o selênio em comparação aos demais indicadores é fruto da combinação do seu menor teor, assim como a menor inclusão no selenito de sódio como fonte majoritária do mineral, assim como a segunda maior variação do DGM alvo (superando apenas o manganês no tamanho médio das partículas) e a maior variação de massa específica em relação ao produto.

Tais resultados confirmam a importância de reduzir ao máximo a variação de características físicas dos ingredientes que compõem uma formulação para promover uma mistura homogênea.

5. CONCLUSÕES

Nas condições desse estudo, os misturadores de pá e helicoidal podem operar em qualquer volume de ocupação para obtenção de uma mistura homogênea, tendo como referência máximo de 10% CV. Contudo, quando se objetiva os melhores resultados de homogeneidade de mistura para o perfil de produto estudado, isso é alcançado no misturador helicoidal com volume de ocupação superior a 20%.

Os resultados deste estudo são significativos e fornecem informações valiosas para otimizar os processos de mistura em uma indústria fabricante de produtos para alimentação animal, especialmente no caso de formulações cujos ingredientes apresentam importante variação de características físicas.

As conclusões desse estudo são válidas para o processo de mistura, não sendo diretamente aplicadas ao produto final, visto que os demais processos de fabricação posteriores à mistura podem afetar a sua qualidade.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

- Avaliar o potencial de segregação do produto após a mistura;
- Determinar o tempo de mistura ideal para cada misturador.

7. REFERÊNCIAS

ABDULLAH, E. C.; GELDART, D. The use of bulk density measurements as flowability indicators. **Powder Technology**, v. 102, n. August 1998, p. 151–165, 1999.

ALLTECH. **Pesquisa Perspectivas do Setor Agroalimentar da Alltech para 2023 compartilha dados globais de produção de ração e tendências para o setor | Alltech**. Disponível em: <<https://www.alltech.com/pt-br/press-release/pesquisa-perspectivas-do-setor-agroalimentar-da-alltech-para-2023-compartilha-dados>>. Acesso em: 14 abr. 2023.

AOAC. AOAC Guidelines for Laboratory Validation for Dietary Supplements. p. 1–38, 2002.

ARRATIA, P. E.; DUONG, N. H.; MUZZIO, F. J.; GODBOLE, P.; LANGE, A.; REYNOLDS, S. Characterizing mixing and lubrication in the Bohle Bin blender. **Powder Technology**, v. 161, n. 3, p. 202–208, 2006.

AXE, D. E. Factors affecting uniformity of a mix. **Animal Feed Science and Technology**, v. 53, n. 2, p. 211–220, 1995.

BEHNKE, K. C. Feed manufacturing technology: Current issues and challenges. **Animal Feed Science and Technology**, v. 62, n. 1 SPEC. ISS., p. 49–57, 1996.

BENKOVIĆ, M.; BELŠČAK-CVITANOVIĆ, A.; KOMES, D.; BAUMAN, I. Physical Properties of Non-Agglomerated Cocoa Drink Powder Mixtures Containing Various Types of Sugar and Sweetener. **Food and Bioprocess Technology**, v. 6, n. 4, p. 1044–1058, 2013.

BIAZZI, H. M.; TUBIN, J. S. B.; CONTE, R. A.; ROBAZZA, W. da S.; PAIANO, D. Different sieving methods for determining the physical characteristics in ground corn. **Acta Scientiarum - Animal Sciences**, v. 44, n. 1955, p. 1–7, 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 65, de 21 de novembro de 2006. Regulamento técnico sobre os procedimentos para a fabricação e o emprego de produtos destinados à alimentação animal com medicamento de uso veterinário. **Diário da União**, 2009. Disponível em: <<http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=visualizarAtoPortalMapa&chave=2113570100>>. Acesso em: 20 nov. 2022.

BRASIL. PORTARIA SDA Nº 798, DE 10 DE MAIO DE 2023 - PORTARIA SDA Nº 798, DE 10 DE MAIO DE 2023. **Diário da União**, p. 1–15, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-pecuarios/alimentacao-animal/PORTARIASDAN798DE10DEMAIODE2023PORTARIASDAN798DE10DEMAIODE2023DOUImprensaNacional.pdf>>.

BRIDGWATER, J. Mixing of powders and granular materials by mechanical means - A perspective. **Particuology**, v. 10, n. 4, p. 397–427, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.partic.2012.06.002>>.

CHO, J.; ZHU, Y.; LEWKOWICZ, K.; LEE, S. H.; BERGMAN, T.; CHAUDHURI, B. Solving granular segregation problems using a biaxial rotary mixer. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 57–58, p. 42–50, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2012.04.002>>.

CLARK, P. M.; BEHNKE, K. C.; POOLE, D. R. Effects of marker selection and mix time on the coefficient of variation (mix uniformity) of broiler feed. **Journal of Applied Poultry Research**, v. 16, n. 3, p. 464–470, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1093/japr/16.3.464>>.

Compêndio Brasileiro de Alimentação Animal 2023 - Sindirações. Disponível em: <<https://sindiracoes.org.br/compendio-brasileiro-alimentacao-animal/>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

EMBRAPA. **EMBRAPA - ENGORDA DE BOVINOS EM CONFINAMENTO ASPECTOS GERAIS.** Disponível em: <<https://old.cnpqg.embrapa.br/publicacoes/doc/doc64/05alimentos.html>>. Acesso em: 14 maio. 2023.

FAO. **Global agriculture towards 2050.** . Acesso em: 9 abr. 2023.

FELI, C. S. **Garantindo a misturabilidade ideal na fabricação de rações: Parte 3 - Fatores que afetam o desempenho do misturador.** Disponível em: <https://www.feedmachinery.com/articles/feed_technology/mixability3/>. Acesso em: 15 abr. 2023.

FELL, J. T.; BECCHI, C. S. **DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE MISTURA NECESSÁRIO À OBTENÇÃO DA HOMOGENEIDADE NA DIETA TOTAL PARA BOVINOS DE LEITE DA GRANJA FELL, DO MUNICÍPIO DE BOM RETIRO DO SUL/RS.** [s.l: s.n.]. . Acesso em: 25 jan. 2022.

GARG, V.; DENG, T.; BRADLEY, M. S. A. A new method for assessing powder flowability based on physical properties and cohesiveness of particles using a small quantity of samples. **Powder Technology**, v. 395, p. 708–719, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.10.027>>.

GRAIN MACHINERY. **Moinho de rolos para grãos – CTGRAIN.** Disponível em: <<http://ctgrainmachine.com.br/3-1-roller-mill/171558/>>. Acesso em: 14 maio. 2023.

GUO, L.; TABIL, L. G.; WANG, D.; WANG, G. Influence of moisture content and hammer mill screen size on the physical quality of barley, oat, canola and wheat straw briquettes. **Biomass and Bioenergy**, v. 94, p. 201–208, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.09.005>>.

HAFEEZ, A.; MADER, A.; RUHNKE, I.; RÖHE, I.; GOODARZI BOROOJENI, F.; YOUSAF, M. S.; MÄNNER, K.; ZENTEK, J. Implication of milling methods, thermal

treatment, and particle size of feed in layers on mineral digestibility and retention of minerals in egg contents. **Poultry Science**, v. 94, n. 2, p. 240–248, 2015.

HALIDAN, M.; CHANDRATILLEKE, G. R.; DONG, K. J.; YU, A. B. Mixing performance of ribbon mixers: Effects of operational parameters. **Powder Technology**, v. 325, p. 92–106, 2018.

HANNICKEL, A.; HENRIQUE, M.; LINS, H.; BARROS, D.; SIGAUD, R. X. Image J como ferramenta para medida da área de partículas de magnetita em três escalas nanométricas. **Cit**, v. 4, p. 16–26, 2002.

IFIF. International Feed Industry Federation – Global Feed Statistics. 2021. Disponível em: <<https://ifif.org/global-feed/statistics/>>.

JAIN, N.; OTTINO, J. M.; LUEPTOW, R. M. Regimes of segregation and mixing in combined size and density granular systems: An experimental study. **Granular Matter**, v. 7, n. 2–3, p. 69–81, 2005.

KAMESH, R.; VADDAGANI, S.; SUMANA, C.; RANI, K. Y.; GOPIREDDY, S. R.; URBANETZ, N. A. Six-directional sampling method and mean mixing indices for solids blending performance analysis of DEM simulations. **Powder Technology**, v. 398, p. 117051, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117051>>.

KUO, H. P.; KNIGHT, P. C.; PARKER, D. J.; SEVILLE, J. P. K. Solids circulation and axial dispersion of cohesionless particles in a V-mixer. **Powder Technology**, v. 152, n. 1–3, p. 133–140, 2005.

LANCHEROS, J. P.; ESPINOSA, C. D.; STEIN, H. H. Effects of particle size reduction, pelleting, and extrusion on the nutritional value of ingredients and diets fed to pigs: A review. **Animal Feed Science and Technology**, v. 268, n. June, p. 114603, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114603>>.

LEMIEUX, M.; BERTRAND, F.; CHAOUKI, J.; GOSSELIN, P. Comparative study of the mixing of free-flowing particles in a V-blender and a bin-blender. **Chemical Engineering Science**, v. 62, n. 6, p. 1783–1802, 2007.

LIMA, G. J. M. M.; NONES, K. Os cuidados com a mistura de rações na propriedade. **Circular Técnica n. 19**, v. 1 ed., p. 20, 1997a.

LIMA, Gustavo. J. M. M.; NONES, K. DETERMINAÇÃO DO TEMPO ÓTIMO DE MISTURA DE UM MISTURADOR DE RAÇÕES. **EMBRAPA**, p. 3–4, 1997b. . Acesso em: 14 abr. 2023.

LIPPEL. **Moinho de Martelos MT-500 | Moinhos de Martelos | Trituradores | Processamento | Produtos | Lippel.** Disponível em: <<https://www.lippel.com.br/moinhos-de-martelos/moinho-de-martelos-mt-500/>>. Acesso em: 14 maio. 2023.

LYU, F.; THOMAS, M.; HENDRIKS, W. H.; VAN DER POEL, A. F. B. Size reduction in feed technology and methods for determining, expressing and predicting particle size: A review. **Animal Feed Science and Technology**, v. 261, n. November 2019, p. 114347, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.114347>>.

MAGGISAN. **Maggisan - Misturador.** Disponível em: <<https://www.maggisan.com.br/produtos/maquinas-industriais/misturador/>>. Acesso em: 26 jan. 2022.

MAKALVES. **Makalves Indústria | Fabricante de máquinas e equipamentos personalizados para o setor alimentício.** Disponível em: <<https://www.makalves.com.br/categoria/misturadores/5>>. Acesso em: 21 jan. 2022.

MENBARI, A.; HASHEMNIA, K. Studying the particle size ratio effect on granular mixing in a vertically vibrated bed of two particle types. **Particuology**, v. 53, p. 100–111, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.partic.2020.01.007>>.

MENDEZ, A. S. L.; DE CARLI, G.; GARCIA, C. V. Evaluation of powder mixing operation during batch production: Application to operational qualification procedure in the pharmaceutical industry. **Powder Technology**, v. 198, n. 2, p. 310–313, 2010.

MOHALLEM, D. F.; FREITAS, R. F.; TAVARES, M.; GUIMARÃES, E. C.; SILVA, P. L. Evaluation of the coefficient of variation as a precision measure in experiments with broilers. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 60, n. 2, p. 449–453, 2008.

MUZZIO, F. J.; GOODRIDGE, C. L.; ALEXANDER, A.; ARRATIA, P.; YANG, H.; SUDAH, O.; MERGEN, G. Sampling and characterization of pharmaceutical powders and granular blends. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 250, n. 1, p. 51–64, 2003.

MUZZIO, F. J.; ROBINSON, P.; WIGHTMAN, C.; DEAN BRONE. Sampling practices in powder blending. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 155, n. 2, p. 153–178, 1997.

PARINI, C. J. Estudo comparativo de métodos de determinação do tamanho de partícula. **Dissertação de Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais**, p. 129, 2003.

POUX, M.; FAYOLLE, P.; BERTRAND, P.; BRIDOUX, D.; BOUSQUET, J. Powder mixing: some practical rules applied to agitated systems. **Powder Technology**, p. 22, 1990.

PROCESS, P. **Volume de mistura (tamanho do lote) - Recomendações de volume de enchimento do misturador de pó**. Disponível em: <https://powderprocess.net/Mixing/Mixing_Volume.html>. Acesso em: 15 maio. 2023.

R CORE TEAM. **R: The R Project for Statistical Computing**. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

REESE, D. A.; FOLTZ, K. L.; MORITZ, J. S. Effect of mixing and sampling method on pelleted feed nutrient analysis and diet formulation validation. **Journal of Applied Poultry Research**, v. 26, n. 2, p. 219–225, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3382/japr/pfw065>>.

ROCHA, A. G.; MALLMANN, C. A. Uniformidade de mistura das rações e seu efeito no desempenho de frangos de corte. **MANANCIAL, repositória digital da UFSM**, p. 1–87, 2014.

SAENSUKJAROENPHON, M. THE EFFECT OF INGREDIENT PROPERTIES, LIQUID SYSTEM AND MIX TIME ON UNIFORMITY OF MIX AND TESTING OF UNIFORMITY OF MIX. n. August, 2016.

SHENOY, P.; VIAU, M.; TAMMEL, K.; INNINGS, F.; FITZPATRICK, J.; AHRNÉ, L. Effect of powder densities, particle size and shape on mixture quality of binary food powder mixtures. **Powder Technology**, v. 272, p. 165–172, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.11.023>>.

THOMAS, M.; HENDRIKS, W. H.; VAN DER POEL, A. F. B. Size distribution analysis of wheat, maize and soybeans and energy efficiency using different methods for coarse grinding. **Animal Feed Science and Technology**, v. 240, n. March, p. 11–21, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.03.010>>.

TOSO, E. A. V.; MORABITO, R. Otimização no dimensionamento e seqüenciamento de lotes de produção: estudo de caso numa fábrica de rações. **Gestão & Produção**, v. 12, n. 2, p. 203–217, 2005.

TOSO, E. A. V.; MORABITO, R. Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes de Produção na Indústria de Suplementos para Nutrição Animal. p. 196, 2008.

TOSO, E. A. V.; MORABITO, R.; CLARK, A. R. Lot sizing and sequencing optimisation at an animal-feed plant. **Computers and Industrial Engineering**, v. 57, n. 3, p. 813–821, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2009.02.011>>.

VASSILEVA, E.; HOENIG, M. Determination of the total and extractable mass fractions of cadmium and lead in mineral feed by using isotope dilution inductively coupled plasma mass spectrometry. **Analytica Chimica Acta**, v. 701, n. 1, p. 37–44, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2011.05.045>>.

WILCOX, R. A.; DEYOE, C. W.; PFOST, H. B. A Method for Determining and Expressing the Size of Feed Particles by Sieving. **Poultry Science**, v. 49, n. 1, p. 9–13, 1 jan. 1970. . Acesso em: 18 jun. 2024.

ZANI, A. **BOLETIM INFORMATIVO DO SETOR DEZEMBRO/2022**. Disponível em: <<https://sindiracoes.org.br/boletim-informativo-do-setor/>>.

ZINN, R. A. A Guide to Feed Mixing. **University of California , Davis**, 1999.