

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial
Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos

Tese de Doutorado



**COMPACTAÇÃO DO ARROZ EM CASCA NO ARMAZENAMENTO A
GRANEL E SEUS EFEITOS SOBRE PARÂMETROS DE INTERESSE
OPERACIONAL PARA A AERAÇÃO**

Jeferson Cunha da Rocha
Engenheiro Agrícola
Mestre em Ciência e Tecnologia Agroindustrial

Pelotas, 2020

Jeferson Cunha da Rocha

**COMPACTAÇÃO DO ARROZ EM CASCA NO ARMAZENAMENTO A
GRANEL E SEUS EFEITOS SOBRE PARÂMETROS DE INTERESSE
OPERACIONAL PARA A AERAÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do Título de Doutor em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Comitê de Orientação:

Prof. Dr. Moacir Cardoso Elias (DCTA-UFPeI)

Prof. Dr. Maurício de Oliveira (DCTA-UFPeI)

Prof. Dr. Ricardo Scherer Pohndorf (CDTEC-UFPeI)

Pelotas, 2020

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

R672c Rocha, Jeferson Cunha da

Compactação do Arroz em Casca no Armazenamento a Granel e seus Efeitos Sobre Parâmetros de Interesse Operacional para a Aeração / Jeferson Cunha da Rocha ; Moacir Cardoso Elias, orientador ; Maurício de Oliveira, Ricardo Scherer Pohndorf, coorientadores. — Pelotas, 2020.

92 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2020.

1. Massa específica aparente. 2. Aeração - Perda de carga . 3. Grãos a granel - Deformação da massa . I. Elias, Moacir Cardoso, orient. II. Oliveira, Maurício de, coorient. III. Pohndorf, Ricardo Scherer, coorient. IV. Título.

CDD : 664

JEFERSON CUNHA DA ROCHA

**COMPACTAÇÃO DO ARROZ EM CASCA NO ARMAZENAMENTO A
GRANEL E SEUS EFEITOS SOBRE PARÂMETROS DE INTERESSE
OPERACIONAL PARA A AERAÇÃO**

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutor em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

06/03/2020

Banca Examinadora de Tese

Prof. Dr. Moacir Cardoso Elias – UFPEL-FAEM

Prof^a. Dra. Bianca Pio Ávila – UFPEL-FAEM

Prof. Dr. Cristiano Dietrich Ferreira - UNISINOS

Prof. Dr. Volnei Luis Meneghetti - IFFAR

Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi - UFSM-CCR

À família, pai, mãe e irmão, que se fazem presentes em todas as conquistas e desafios em minha vida, trazendo consigo a esperança, o acolhimento e a alegria de que todos precisam.

Ao meu filho João Pedro Rocha, pela compreensão, coragem e força na superação do meu distanciamento durante esta etapa.

Em memória dos queridos familiares: Lise Florência Caiaffo da Rocha (avó materna), João Antônio Machado da Rocha (avô paterno), Eva da Rosa (avó materna) e Lorena da Rosa Rodrigues (tia materna), os quais eternizaram e enriqueceram meu coração com memórias de muito afeto e carinho.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A DEUS pela família que tenho e pelas boas pessoas que convivi ao longo desta jornada. Que o SENHOR continue iluminando o caminho destas pessoas e abençoando nossas vidas com saúde e prosperidade.

Ao professor Dr. Moacir Cardoso Elias, orientador e eterno mestre, pelos ensinamentos, confiança, apoio, compromisso e grande amizade oferecida, sempre conduzindo e realizando seus feitos com excelência, paixão e zelo na missão desempenhada pela nobre profissão.

Aos amigos e professores, Dr. Maurício de Oliveira, Dr. Ricardo Scherer Pohndorf (coorientadores), e Dr. Volnei Luis Meneghetti, profissionais esplêndidos, pela dedicação e competência no enriquecimento desta tese, e principalmente pela valiosa amizade compartilhada.

A Ana Carla e Isadora Vaghetti, pela compreensão e incentivo depositados em todos os momentos desta jornada.

Aos demais funcionários e professores do DCTA, em especial a todos os colegas de pós-graduação, bolsistas e estagiários do Laboratório de Pós-Colheita, Industrialização e Qualidade de Grãos, pelo apoio, solidariedade, e agradável convivência ao longo do curso.

À Universidade Federal de Pelotas, à Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos por proporcionarem o meu aperfeiçoamento profissional.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos, ao CNPQ e à CONAB, pelos recursos que possibilitaram parte do experimento.

EPÍGRAFE

“...Cabe ao professor, especialmente ao educador, tirar os obstáculos entre a pessoa e o conhecimento, e que ela sinta, no professor e educador, como o conhecimento transformou aquela pessoa...”

Leandro Karnal

Resumo

Rocha, Jeferson Cunha da. **Compactação do Arroz em Casca no Armazenamento a Granel e seus Efeitos Sobre Parâmetros de Interesse Operacional para a Aeração**. 92p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

O objetivo neste estudo foi avaliar alterações na resistência ao fluxo de ar de aeração e na massa específica aparente do arroz de grãos longo fino, longo e curto, decorrentes da compactação da massa de grãos a granel. Amostras de arroz, em casca, das classes de grãos curtos, longos e longos-finos, foram submetidas à compactação de massa nas pressões de 50 kPa, 130 kPa e 210 kPa, para investigar a perda de carga do ar de aeração utilizando os modelos de Darcy (1856), Shedd (1953), Ergun (1952), e Hukill & Ives (1955), e a massa específica aparente dos grãos em compactação utilizando os modelos de Overhults (1973), Thompson (1987), Johanson e Cox (1989), Steffe (1992), e de Cheng (2017). Os resultados revelaram que (a) o arroz da classe de grãos curtos apresenta o maior percentual de compactação, seguido do arroz de grãos longos e de grãos longos-finos; (b) independentemente da classe de grãos de arroz, as diferentes pressões de compactação não modificaram o comportamento da dinâmica do processo de compactação, ocorrendo o maior incremento de massa específica aparente no início e o maior tempo para a estabilização do processo na maior pressão de compactação. Dos seis modelos preditivos utilizados para analisar a variação da massa específica aparente dos grãos, em função da pressão de compactação, o modelo de Cheng apresentou o melhor desempenho, seguido do modelo de Johanson e Cox. Dos quatro modelos usados para avaliar a perda de carga do ar de aeração, em função da compactação da massa de grãos, três apresentaram bom ajuste aos dados experimentais, sendo Ergun e Hukill & Ives os modelos que resultaram em menores valores de erro médio relativo, seguido do modelo de Shedd. Com valores preditivos de perda de carga próximos dos experimentais, o modelo de Ergun pode ser sugerido com melhor desempenho para as diferentes classes de grãos de arroz em casca estudadas.

PALAVRAS-CHAVE: massa específica aparente; perda de carga na aeração; deformação da massa de grãos a granel.

Abstract

Rocha, Jeferson Cunha da. Compacting Paddy Rice in Bulk Storage and Effects on Parameters Operational Interest for Aeration. 92p. Thesis (Doutorate in Food Science and Techology) Graduate Program in Science and Food Technology. Federal University of Pelotas, Pelotas, 2020.

The objective of this study was to evaluate changes in the resistance to the aeration air flow and in the bulk density of long fine, long and short grain rice, resulting from the compacting of the bulk grain mass. Paddy rice samples from the short, long and long-thin grain, were subjected to mass compaction at pressures of 50 kPa, 130 kPa and 210 kPa, to investigate the drop pressure using the models by Darcy (1856), Shedd (1953), Ergun (1952), and Hukill & Ives (1955), and the modify bulk density grains in compaction using the models of Overhults (1973), Thompson (1987), Johanson and Cox (1989), Steffe (1992), and Cheng (2017). The results revealed that (a) paddy rice of short grain has the highest percentage of compaction, followed by long grain and long-thin grains; (b) regardless of the class of rice grains, the different compaction pressures did not change the behavior of the compaction process dynamics, with the largest increase in bulk density grains occurring at the beginning and the longest time for process stabilization at the highest pressure compaction. Of the six predictive models used to analyze the variation of the bulk density grain mass, as a function of the compaction pressure, the Cheng model presented the best performance, followed by the Johanson and Cox model. Of the four models used to evaluate the drop pressure aeration air, due to the compacting of the grain mass, three showed good adjustment to the experimental data, with Ergun and Hukill & Ives being the models that resulted in lower values of relative average error, followed by the Shedd model. With drop pressure predictive values close to the experimental ones, the Ergun model can be suggested with better performance for the different class of paddy rice grains studied

KEYWORDS: bulk density grain; drop pressure in aeration; deformation of bulk grain mass.

Lista de Figuras

Figura 1 – Perda de carga provocada pela massa de grãos de trigo (A) e de milho (B), estimadas pelos modelos de Ergun (1952), ajustado por Haque (2011), e de Shedd (1953).....	24
Figura 2 – Esquema do sistema de aeração: A, ventilador centrífugo; B, registro; C, ponto de coleta da perda de carga no sistema; D, câmara de compactação da massa de grãos; E, ponto de coleta da velocidade do ar; F, inversor de frequência.....	36
Figura 3 – Perda de carga no ar de aeração ocasionada pela massa de grãos	36
Figura 4 – Anemômetro de fio quente modelo Testo 405-V1	37
Figura 5 – Pontos de coleta da velocidade do ar (A) e posicionamento do anemômetro de fio quente (B).....	37
Figura 6 – Manômetro digital de pressão diferencial.....	38
Figura 7 – Sistema pneumático de compressão, vista frontal, em perspectiva	39
Figura 8 – Sistema pneumático de compressão, vista posterior, em perspectiva	40
Figura 9 – Câmara de compactação da massa de grãos, vista lateral (A) e corte (B), em perspectiva	41
Figura 10 – Célula de carga (A) e indicador digital (B).....	41
Figura 11 – Fluxograma do processo de calibração do sistema pneumático	42
Figura 12 – Detalhe da instalação do anel de vedação interno, corte transversal da câmara (A) e corte longitudinal ampliado da câmara (B)	43
Figura 13 – Fluxograma das principais etapas para o ensaio de compactação da massa de grãos	45
Figura 14 – Fluxograma das principais etapas para o ensaio de perda de carga da massa de grãos compactada.....	45
Figura 15 – Dinâmica de deformação da camada de grãos na compactação do arroz longo fino, em casca	55
Figura 16 – Dinâmica de deformação da camada de grãos na compactação do arroz longo, em casca	56
Figura 17 – Dinâmica de deformação da camada de grãos na compactação do arroz curto, em casca	56
Figura 18 – Projeção dos modelos de Thompson, Thompson ^a (modificado), Steffe, Johanson, Overhults, e Cheng, para a massa específica aparente do arroz longo fino, em casca, em função da pressão de compactação	59

Figura 19 – Projeção dos modelos de Thompson, Thompson ^a (modificado), Steffe, Johanson, Overhults, e Cheng, para a massa específica aparente do arroz longo, em casca, em função da pressão de compactação	59
Figura 20 – Projeção dos modelos de Thompson, Thompson ^a (modificado), Steffe, Johanson, Overhults, e Cheng, para a massa específica aparente do arroz curto, em casca, em função da pressão de compactação	60
Figura 21 – Variação no fluxo de ar praticado em relação aos valores programados...	61
Figura 22 – Influência das diferenças entre as classes de arroz, em casca, e do fluxo de ar na perda de carga da massa de grãos, sem compactação.....	62
Figura 23 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, sobre os pontos experimentais de perda de carga na aeração do arroz longo fino, em casca, sem compactação de massa	64
Figura 24 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill e Ives, e Ergun sobre os pontos experimentais de perda de carga na aeração do arroz longo, em casca, sem compactação de massa	65
Figura 25 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, sobre os pontos experimentais de perda de carga na aeração do arroz curto, em casca, sem compactação de massa	66
Figura 26 – Influência da pressão de compactação da massa de grãos e do fluxo de ar na perda de carga na aeração do arroz longo fino, em casca	68
Figura 27 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, para a perda de carga na aeração do arroz longo fino, em casca, com pressão de 50 kPa na compactação da massa de grãos.....	70
Figura 28 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, para a perda de carga na aeração do arroz longo fino, em casca, com pressão de 130 kPa na compactação da massa de grãos.....	71
Figura 29 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill e Ives, e Ergun, para a perda de carga na aeração do arroz longo fino, em casca, com pressão de 210 kPa na compactação da massa de grãos.....	71
Figura 30 – Influência da pressão de compactação da massa de grãos e do fluxo de ar na queda de pressão na aeração do arroz longo, em casca.....	73
Figura 31 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, sobre os pontos experimentais de perda de carga na aeração do arroz longo, em casca, com pressão de 50 kPa na compactação da massa de grãos.....	75
Figura 32 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, sobre os pontos experimentais da perda de carga na aeração do arroz longo, em casca, com pressão de 130 kPa na compactação da massa de grãos.....	76

Figura 33 - Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, sobre os pontos experimentais da perda de carga na aeração do arroz longo, em casca, com pressão de 210 kPa na compactação da massa de grãos	76
Figura 34 – Influência da pressão de compactação da massa de grãos e do fluxo de ar na perda de carga na aeração do arroz curto, em casca	79
Figura 35 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, sobre os pontos experimentais de perda de carga na aeração do arroz curto, em casca, com pressão de 50 kPa na compactação da massa de grãos	81
Figura 36 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, sobre os pontos experimentais de perda de carga na aeração do arroz curto, em casca, com pressão de 130 kPa na compactação da massa de grãos	81
Figura 37 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, sobre os pontos experimentais de perda de carga na aeração do arroz em casca, curto, com pressão de 210 kPa na compactação da massa de grãos	82

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Modelos que relacionam a massa específica aparente e a pressão de compactação	32
Tabela 2 – Caracterização física das amostras de grãos de arroz, descascados, para o enquadramento de classes	34
Tabela 3 – Delineamento experimental utilizado na compactação de massa do arroz em casca	35
Tabela 4 – Fluxos de ar selecionados para aeração da massa de grãos	37
Tabela 5 – Propriedades físicas e métodos utilizados para a caracterização física dos grãos	47
Tabela 6 – Equações utilizadas na determinação do percentual e da massa específica aparente da massa de grãos compactada	48
Tabela 7 – Modelos utilizados para analisar a massa específica aparente do arroz, em casca, na compactação da massa de grãos	48
Tabela 8 – Modelos utilizados para analisar a perda de carga na aeração da massa de grãos compactada.....	49
Tabela 9 – Caracterização física dos grãos de arroz, em casca	50
Tabela 10 – Influência da pressão de compactação sobre a massa específica aparente do arroz, em casca.....	52
Tabela 11 – Percentuais de compactação da massa de grãos de arroz.....	53
Tabela 12 – Constante e parâmetros obtidos pelo polinômio utilizado para descrever o comportamento dos percentuais de deformação da massa em função da pressão e do tempo de compactação da massa de grãos.....	58
Tabela 13 – Parâmetros obtidos pelos modelos utilizados para analisar o comportamento da massa específica aparente das diferentes classes de arroz, em casca, em função da pressão de compactação	60
Tabela 14 – Parâmetros obtidos dos modelos utilizados para analisar a perda de carga na aeração do arroz longo fino, longo e curto, em casca, sem compactação da massa	67
Tabela 15 – Parâmetros obtidos dos modelos utilizados para analisar a perda de carga na aeração do arroz longo fino, em casca, com compactação da massa	72
Tabela 16 – Parâmetros obtidos dos modelos utilizados para analisar a perda de carga na aeração do arroz longo, em casca, com compactação da massa.....	77
Tabela 17 – Parâmetros obtidos dos modelos utilizados para analisar a perda de carga na aeração do arroz curto, em casca, com compactação da massa.....	83

Sumário

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivo geral	17
1.2. Objetivos específicos	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. Armazenamento dos grãos a granel.....	19
2.1.1. Dimensões e forma dos grãos	20
2.1.2. Massa específica aparente dos grãos a granel	20
2.1.3. Porosidade da massa de grãos a granel	22
2.2. Resistência do fluxo de ar através da massa de grãos a granel.....	23
2.3. Compactação da massa de grãos a granel.....	28
3. MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1. Amostras de arroz.....	34
3.2. Delineamento experimental.....	35
3.3. Pressões de compactação.....	35
3.4. Sistema de aeração.....	35
3.5. Fluxo de ar.....	36
3.6. Velocidade do ar.....	37
3.7. Verificação do fluxo de ar.....	37
3.8. Perda de carga.....	38
3.9. Manejo do fluxo de ar no sistema aeração.....	38
3.10. Sistema pneumático de compressão.....	39
3.11. Câmara de compactação da massa de grãos.....	40
3.12. Calibração das pressões de compactação.....	41
3.13. Preparação da câmara de compactação.....	42
3.14. Deformação da massa de grãos e massa específica aparente na compactação..	44
3.15. Ensaio de compactação da massa de grãos.....	44
3.16. Ensaio de perda de carga na compactação da massa de grãos.....	45
3.17. Dinâmica de deformação da massa de grãos em compactação	46

3.18. Avaliações	46
3.18.1. Grau de umidade.....	46
3.18.2. Propriedades físicas.....	46
3.18.3. Curvas de perda de carga.....	48
3.18.4. Percentual de compactação e massa específica aparente na compactação	48
3.19. Análise estatística.....	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1. Caracterização física dos grãos de arroz.....	50
4.2. Influência da compactação de massa sobre a massa específica aparente dos grãos	51
4.2.1. Dinâmica do processo de compactação	54
4.2.2. Análise das alterações de massa específica aparente pelos modelos preditivos de compactação de massa	58
4.3. Influência da compactação de massa sobre o fluxo de ar de aeração	61
4.3.1. Perda de carga na aeração do arroz em casca sem compactação da massa de grãos.....	62
4.3.2. Análise da perda de carga na aeração do arroz em casca sem compactação da massa de grãos.....	64
4.4. Perda de carga na aeração do arroz em casca com compactação da massa de grãos.....	67
4.4.1. Perda de carga na aeração do arroz da classe longo fino.....	67
4.4.2. Perda de carga na aeração do arroz longo.....	73
4.4.3. Perda de carga na aeração do arroz curto	78
5. CONCLUSÕES	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

1. INTRODUÇÃO

Os grãos apresentam características próprias que lhes conferem propriedades específicas, as quais interferem tanto nos processos conservativos quanto nos tecnológicos. O conhecimento das propriedades físicas dos grãos é de grande importância para a pós-colheita, pois auxilia na tomada de decisão de muitas das operações a que são submetidos. Destaca-se, pelo tema abordado nesta pesquisa, dentre as diversas propriedades físicas dos grãos, a massa específica aparente.

A massa específica aparente ou o peso volumétrico dos grãos expressa a relação entre a massa e o volume que os grãos depositados a granel ocupam (kg m^{-3}). É um parâmetro importante aplicado em diferentes componentes do dimensionamento, especialmente no estrutural (forças e pressões), no transporte (capacidade dinâmica e fluxo) e na cubagem (capacidade estática ou volume de produto estocado).

Os grãos, numa carga a granel, constituem uma massa descontínua, onde cada grão se acomoda aleatoriamente, grão a grão, formando espaços denominados porosidade intergranular, uma propriedade física intimamente relacionada com a massa específica aparente. A porosidade intergranular da massa de grãos é definida como a relação entre o volume ocupado por vazios e o volume ocupado por sólidos.

Esta fração de vazios (espaços presentes na massa de grãos) é responsável pela maior ou menor resistência a passagem forçada de um fluxo de ar, condição de fundamental importância para a conservação no sistema a granel, pois permite que o armazenador interfira nas condições de temperatura e umidade do ecossistema de armazenamento, através da aeração, sem que ocorra a remoção dos grãos.

Muitos armazenistas agem como se a massa específica aparente do produto armazenado permanecesse constante em todo o compartimento. Embora, para pequenos volumes isso seja verdadeiro, para efeitos práticos nos atuais silos comerciais, a massa específica aparente aumenta substancialmente devido às pressões de compressão. Os grãos são frequentemente sujeitos à compressão nos processos de transporte, manuseio e armazenamento. Como os grãos são materiais porosos, sua massa específica aparente é multifatorial, sendo influenciada por fatores como formato, dimensões, integridade física, condição sanitária, integridade biológica, impurezas e umidade. No armazenamento a granel, também influencia a pressão a que forem submetidos.

No armazenamento a granel, a compactação da massa de grãos é causada pela pressão excessiva do próprio produto armazenado. As camadas inferiores de uma massa de grãos depositada a granel são comprimidas devido ao peso dos grãos que ficam acima. A pressão de compressão pode ser alta o suficiente para causar problemas de qualidade, e faz com que a porosidade da massa de grãos diminua, o que leva a aumentos na resistência ao fluxo de ar, prejudicando a eficiência das operações de aeração e secagem.

Nos Estados Unidos, a *Grain Inspection, Packers and Stockyards Administration* (GIPSA), um departamento da *U.S. Department of Agriculture's Agency* (USDA), através de manuais regulamentados pela *Federal Grain Inspection Service* (FGIS) orienta testes, procedimentos e aparelhos considerados oficiais para o levantamento de informações sobre o manuseio com grãos. Assim como no sistema americano, no Brasil a estimativa da quantidade de grãos armazenados a granel é realizada por cubagem e utiliza a massa específica aparente do produto como parâmetro de cálculo. Ela é determinada pelo teste de peso volumétrico dos grãos.

Autores como Thompson e Ross (1983), Malm e Backer (1985), Thompson *et al.* (1987, 1990, 1991) propuseram modelos para determinar a massa específica aparente na compactação dos grãos a granel, de espécies como: cevada, trigo duro vermelho, trigo duro, aveia e girassol. Entretanto, na prática ainda são observadas diferenças expressivas na estimativa da quantidade de grãos em uma massa a granel que sofre compactação. Atualmente, para divergências contratuais e judiciais, a USDA convencionou alguns fatores de correção para a compactação de alguns grãos, porém em nenhum dos renomados trabalhos citados, e pela convenção adotada, há registros para aplicação em grãos de arroz.

Pelo exposto, verifica-se que variações na massa específica aparente de grãos armazenados a granel é um parâmetro crítico para previsão de estoques e na estimativa da perda de carga em sistemas de aeração e de secagem de grãos, tornando relevante o estudo desta importante propriedade física dos grãos.

1.1. Objetivo geral

Analisar efeitos da compactação dos grãos em casca sobre a massa específica aparente e sobre a perda de carga na aeração do arroz das classes de grão curto, longo e longo fino.

1.2. Objetivos específicos

1. Avaliar mudanças de massa específica aparente, provocadas pela compactação da massa de grãos.

2. Identificar a dinâmica do processo de compactação da massa de grãos.

3. Avaliar alterações de massa específica aparente utilizando modelos preditivos de compactação da massa de grãos.

4. Avaliar alterações na pressão do ar de aeração utilizando modelos preditivos de perda de carga, em decorrência da compactação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Armazenamento dos grãos a granel

Após a colheita, o arroz em casca, limpo e seco, é armazenado majoritariamente a granel, em unidades no local de produção, em cerealistas, nas agroindústrias de beneficiamento ou eventualmente em unidades governamentais. O armazenamento seguro requer umidade não superior a 13% (b.u), e para o adequado armazenamento a longo prazo dos grãos, eles devem ser mantidos secos e arrefecidos (NALLADURAI, *et al.* 2002; ELIAS, *et al.* 2017).

A conservação das características físico-química dos grãos por longo tempo exige o controle racional de sua umidade. Dentre as técnicas de pré-processamento de grãos, a mais utilizada é a secagem, na qual o ar é forçado a atravessar a massa granular, promovendo um processo de transferência de calor e massa entre o ar e os grãos (GONELI, 2008). Outra operação de grande importância é a aeração, utilizada com o objetivo de reduzir e manter homogênea a temperatura dos grãos durante o armazenamento evitando oscilações de temperatura ocasionadas pelas correntes convectivas, pelo metabolismo dos próprios grãos e pelo desenvolvimento de insetos e microrganismos (DEVILLA, *et al.* 2005; VANIER, *et al.* 2017).

O objetivo do sistema de aeração é garantir ao ambiente de armazenamento uma condição segura em todos os locais do silo, e não considerar apenas as condições médias do silo como um todo (NAVARRO e NOYES, 2002). Uma massa de grãos é composta de partículas e espaços intergranulares, e a resistência ao fluxo de ar se desenvolve como um resultado da perda de energia por meio de fricção e turbulência, em que o ar é forçado a atravessar a massa de grãos. Por esse motivo, a pressão total fornecida ao ar tem de ser maior que o gradiente de pressão ocorrido no sistema (AFONSO, 1994).

No armazenamento a granel, a massa de grãos pode sofrer compactação devido à pressão vertical exercida pelo próprio peso. A compactação resulta em uma mudança na densidade aparente da massa de grãos, o que, por sua vez, resulta em uma mudança na porosidade. Esta deformação é esperada mesmo em baixas pressões durante o armazenamento de grãos a granel. O conhecimento sobre a permeabilidade da massa de grãos em função da densidade da massa é importante para determinar o

comportamento do fluxo de ar na massa de grãos armazenada (THOMPSON e ROSS, 1983; ELIAS, *et al.* 2015).

2.1.1. Dimensões e forma dos grãos

O conhecimento sobre as dimensões e a forma dos grãos é um importante fator para o entendimento e o desenvolvimento de processos que envolvem a aplicação de um fluxo de ar através da massa de grãos a granel (CENKOWSKI e ZHANG, 1995; MUIR, *et al.* 2005; YUICHI e OGUCHI, 2005).

Neethirajan *et al.*, (2006) e Lukaszuk *et al.*, (2008) afirmam que a resistência ao fluxo de ar em grãos esféricos, como ervilha, foi menor em comparação com grãos de trigo e cevada. Utilizando um fluxo de ar com velocidade de $0,3 \text{ m s}^{-1}$ os autores verificaram que a perda de carga no ensaio com ervilha passou de 32 Pa para 135 Pa no ensaio com colza.

As diferentes espécies e os diferentes genótipos de grãos influenciam as dimensões (OLIVEIRA, *et al.* 2015) e por isso grandemente na porosidade e na resistência ao fluxo de ar (ELIAS, *et al.* 2018). As razões para essas diferenças estão diretamente relacionadas com as formas dos grãos. Alguns dos quais se encaixam mais firmemente, alterando assim o caminho que o ar deve seguir na massa de grãos (LOEWER, *et al.* 1994).

2.1.2. Massa específica aparente dos grãos a granel

Navarro e Noyes (2002) evidenciam que o peso volumétrico da massa de grãos, ou massa específica aparente, é uma propriedade importante do produto a granel, pois interfere na resistência a passagem do fluxo de ar. A massa específica aparente é a razão entre a massa de produto em relação ao volume que ocupa.

Fasina (2007) explica que há quatro formas diferentes de descrever as relações entre massa e volume de produtos a granel: a) Massa específica aparente: É a razão entre a massa de produto e o volume que ocupa, considerando os espaços presentes. b) Massa específica real: É a razão entre a massa de produto e o volume que ocupa, sem considerar os espaços presentes. c) Massa específica real da partícula: É a razão entre a massa da partícula e o volume ocupado pela partícula, sem considerar os

espaços presentes. d) Massa específica aparente da partícula: É a razão entre a massa da partícula e o volume ocupado pela partícula, considerando os espaços presentes.

A massa específica aparente dos grãos é uma importante propriedade física que afeta a resistência ao fluxo de ar. Yang e Willian (1990) realizaram estudos com sorgo e concluíram que a relação é diretamente proporcional, ou seja, quanto maior a massa específica aparente da massa de grãos maior será a resistência imposta por esses à passagem do fluxo de ar.

Em investigações experimentais, a massa específica aparente (propriedade intimamente relacionada com a porosidade intergranular) foi reconhecida como o principal fator determinante da resistência ao fluxo de ar através da massa de grãos (MOLENDAS, *et al.* 2005a).

Segundo Karababa (2006) e Stuart (1980) a massa específica aparente dos grãos a granel diminui à medida que o grau de umidade aumenta. Estes autores verificaram que a massa específica aparente do trigo diminuiu linearmente com o aumento do grau de umidade, este comportamento foi verificado para o milho pipoca que apresentou uma redução na massa específica aparente dos grãos a granel de 0,771 para 0,703 tn m^{-3} quando o grau de umidade foi elevado de 8,95 para 17,12%.

Outros fatores como o método de depósitos dos grãos a granel e o ataque de pragas, também mostraram efeitos consideráveis sobre massa específica aparente dos grãos a granel. Stephens e Foster (1976), em experimentos com milho, encontraram um aumento da resistência ao fluxo de ar de até 300% quando se utiliza espalhadores de grãos, se comparado a resistência quando nenhum espalhador é utilizado.

Alturas de queda dos grãos, no depósito da massa a granel, entre 0, 0,95 e 1,9 metros produziram massa específica aparente diferentes, de 773, 790 e 810 kg m^{-3} (LUKASZUK, *et al.* 2008).

Em experimentos com sorgo e trigo, o distribuidor de grãos produziu uma resistência ao fluxo de ar 110% maior em sorgo e 101% maior em trigo, do que as resistências produzidas pelo enchimento do silo utilizando bico central.

A possível razão para o aumento observado na resistência ao fluxo de ar pode ser em parte devido ao aumento da massa específica aparente decorrente da ação do espalhador (STEPHENS e FOSTER, 1978). O ataque de pragas, em trigo, milho e sorgo, reduziu a massa específica aparente proporcionalmente ao peso seco consumido pelos insetos (ADAMS, 1973).

Cheng *et al.*, (2015; 2017) utilizando amostras de milho e trigo com diferentes graus de umidades e aplicando diferentes pressões de compactação, verificou que a massa específica aparente dos grãos aumentou com a pressão de compactação, independentemente do grau de umidade. Embora as massas específicas aparentes iniciais dos grãos fossem diferentes em diferentes graus de umidade, as massas específicas aparentes finais diferiram pouco, sem nenhum padrão particular de efeito do grau de umidade.

Isso refletiu ao fato de que a massa específica aparente se aproxima de um valor máximo estável à medida que a pressão de compactação aumenta independentemente das condições iniciais de compactação da massa de grãos. Isso também indicou que o conteúdo de umidade afeta a massa específica aparente inicial, mas não a massa específica aparente máxima na compactação. A umidade dos grãos não altera os testes de compactação, e a mudança de massa específica aparente foi devida a compressão da camada de grãos (CHENG, *et al.* 2015; 2017).

2.1.3. Porosidade da massa de grãos a granel

Na modelagem de operações de processamento de grãos a granel como secagem, aeração, transferência de calor e outras similares, as informações sobre o volume de vazios presentes na massa de grãos é um parâmetro importante (NAVARRO e NOYES, 2002; ELIAS, *et al.* 2018).

O volume vazio, comumente medido como porosidade, é definido como a razão entre o volume de vazios e o volume total ocupado por sólidos e espaços, a porosidade está relacionada com a partícula e a massa específica aparente (MOHSENIN, 1986).

A porosidade da massa de grãos é afetada por diversos fatores. Similar à massa específica aparente, a porosidade aumenta com o aumento da umidade. Thompson e Isaac (1967) observaram que a porosidade do milho foi afetada não apenas pela umidade, mas também pelos grãos quebrados, pelo método de secagem e pelo genótipo.

Para o milho seco de 25,7% para 14,7% e depois para 9% de umidade, a porosidade diminuiu de 44,28% para 40,45% e depois 38,64%, respectivamente. O milho sem a remoção dos grãos quebrados apresentou porosidade de 41,06%, e após a retirada dos grãos quebrados, a porosidade foi de 40,27%. Isto mostrou que a remoção do grão quebrado, resultante da colheita mecanizada, causa redução na porosidade uma vez que a presença destes aumenta o volume de vazios (THOMPSON e ISAAC, 1967).

O efeito da massa específica aparente na resistência ao fluxo de ar é fortemente relacionado a porosidade da massa de grãos, que é depende da densidade da massa. Segundo Nimkar e Chattopadhyay (2002), a diminuição da massa específica aparente, incrementa a porosidade da massa, pois aumenta a relação entre o volume ocupado pelos vazios em relação ao volume ocupado pelos sólidos, isso conseqüentemente resulta na redução da resistência ao fluxo de ar através dos grãos (SHAHBAZI, 2011).

2.2. Resistência do fluxo de ar através da massa de grãos a granel

O estudo da resistência do fluxo de ar através de produtos agrícolas foi iniciado por Stirniman et al. em 1931 e continuou por outros tendo sido relatado para grãos e sementes de cereais e oleaginosas (KASHANINEJAD e TABIL, 2009).

Nos projetos de sistemas de secagem e aeração de grãos torna-se indispensável a determinação da resistência ao fluxo de ar na camada de grãos, que pode ser avaliada pela perda de carga ao longo da massa granular (HAQUE, *et al.* 1982).

Na seleção de equipamentos de secagem e aeração é importante que os princípios básicos de movimentação de ar sejam considerados a fim de que toda a massa granular seja uniformemente atravessada pelo ar. Para tanto, os ventiladores são selecionados para fornecer a vazão de ar requerida para promover a secagem ou a aeração em determinada condição de armazenamento. Por esta razão o dimensionamento inadequado do sistema de movimentação do ar pode tornar-se oneroso seja causando a deterioração dos grãos, seja em gasto de material ou em energia elétrica (SILVA, *et al.* 2008; ELIAS, *et al.* 2018).

Os métodos comumente usados em projetos de sistemas de secagem e aeração de grãos não consideram a variabilidade da resistência ao fluxo de ar em várias regiões da massa de grãos armazenados. Na realidade, mudanças locais de resistência ao fluxo de ar em várias regiões da massa podem causar variações na eficiência das operações tecnológicas que incluem o fluxo de ar, tais como: secagem, aeração, resfriamento ou fumigação (SILVA, *et al.* 2008).

A principal tarefa no projeto do sistema de secagem ou aeração é definir o fluxo de ar operacional que, combinado com a relação entre a perda de carga e a velocidade do ar, garantirá o curso desejado do sucesso do projeto. Além da velocidade do ar, outros fatores influenciaram na resistência da massa de grãos ao fluxo de ar e, conseqüentemente, na perda de carga (MOLENDIA, *et al.* 2005a).

Haque (2011) verificou que considerando aumentos na massa específica aparente dos grãos, no decréscimo na fração de vazios com a profundidade da massa de grãos, há uma maior resistência ao fluxo do ar do que a relatada por Shedd (1953).

A Figura 1 apresenta uma comparação da estimativa de perda de carga entre as equações de Shedd (1953) e de Ergun (1952), ajustada por Haque (2011), para dois silos de 9,14 metros de diâmetro contendo 30,48 metros de trigo (silo 1) e de milho (silo 2).

De acordo com os dados de perda de carga, o modelo de Shedd foi adequado para uma profundidade de massa com até 10 metros de altura, acima deste valor foi verificado quedas de pressão muito maiores e melhor estimadas pelo modelo de Ergun ajustado, o qual passou a considerar a diminuição da porosidade da massa ocasionada pela pressão de compressão na massa de grãos.

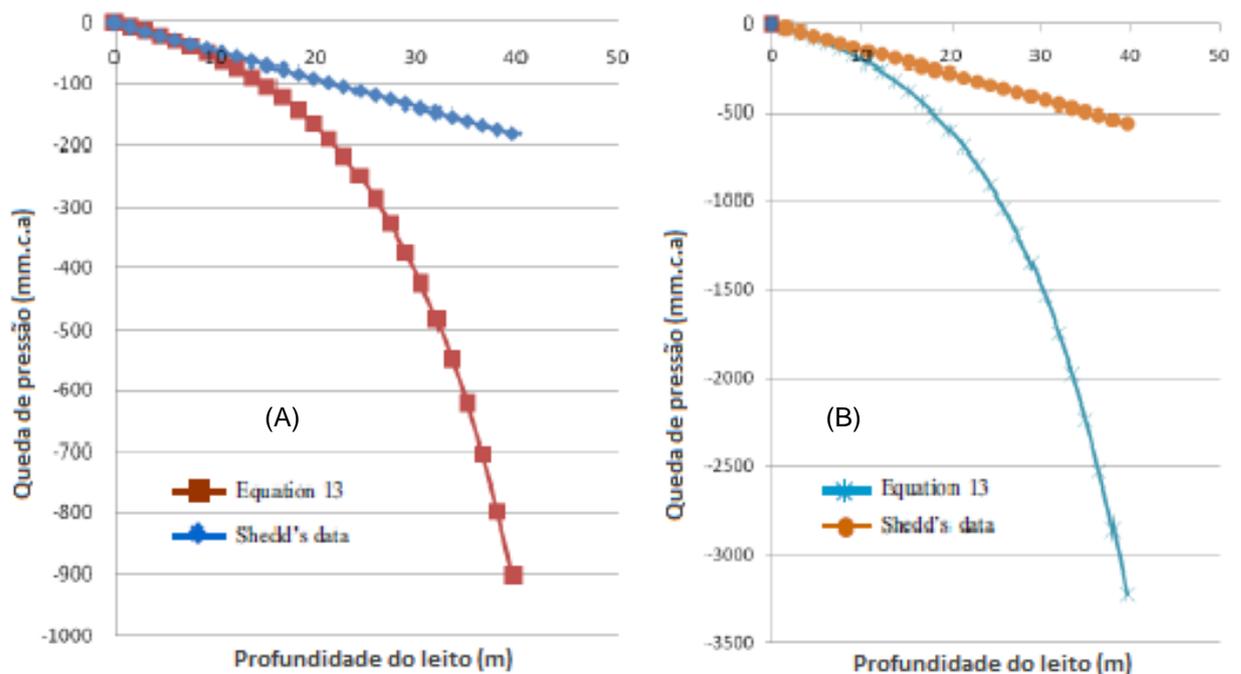


Figura 1 – Perda de carga provocada pela massa de grãos de trigo (A) e de milho (B), estimadas pelos modelos de Ergun (1952), ajustado por Haque (2011), e de Shedd (1953)
Fonte: (HAQUE, 2011).

A resistência do fluxo de ar determinada a partir das tradicionais equações ou gráficos são aplicadas para grãos soltos, limpos e secos e com fluxo de ar na direção ascendente vertical e, em geral, fornecem uma estimativa assertiva para estas condições. Entretanto, é recomendável, em condições que favorecem elevar ou diminuir a perda de carga no sistema, que a resistência ao fluxo de ar deve ser investigada experimentalmente. A eficiência de um sistema de aeração depende principalmente da

uniformidade da distribuição do fluxo de ar em diferentes regiões da massa de grãos (NAVARRO e NOYES, 2002).

As relações entre fluxo de ar e perda de carga são úteis na modelagem matemática de padrões de pressão de fluxo de ar e distribuição de fluxo de ar em massas armazenadas (NALLADURAI, *et al.* 2002). As informações sobre a perda de carga através de uma massa de grãos são geralmente apresentadas como gráficos ou equações (BROKER, *et al.* 1992; NAVARRO e NOYES, 2002).

Quando atravessada por um fluxo de ar, a massa de grãos promove um aumento de pressão no sistema, denominado de perda de carga, que é comumente estimada por meio de curvas empíricas relacionando o fluxo de ar e perda de carga no sistema. A literatura reporta o desenvolvimento de diversos modelos para simular a variação da pressão numa massa de grãos armazenada (BIAGGIONI, *et al.* 2005).

A lei de Darcy é uma função da viscosidade, permeabilidade e velocidade e pode ser usada para prever a resistência do fluxo de ar em materiais granulares a baixas velocidades do ar. A permeabilidade também regula a magnitude das correntes naturais de convecção durante períodos de armazenamento de grãos não aerados.

Tradicionalmente, a base de quase todos os cálculos de engenharia para fluxo através de meios porosos tem sido baseada na Lei de Darcy ou em descobertas empíricas. A lei de Darcy (1856) descreve a equação constitutiva fenomenológica para o fluxo de ar através de meios porosos como (MONTROSS e MCNEILL, 2005):

$$Q = \frac{k A}{\mu} \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right) \quad (1)$$

Para um fluido específico como o ar, as propriedades de k e μ são combinados em um único coeficiente a_1 e simplifica a equação para:

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = a_1 V \quad (2)$$

onde:

ΔP = Pressão do ar (Pa);

ΔL = Altura de camada (m);

a_1 = Constante da equação;

V = Velocidade do ar (m s^{-1}).

A lei de Darcy afirma que a perda de carga varia linearmente com a velocidade. A permeabilidade, ou coeficiente de resistência, reflete a dificuldade em mover um fluido através de um meio poroso e, em princípio, é apenas uma função da estrutura dos poros e a viscosidade do fluido.

O coeficiente de resistência pode ser determinado medindo a perda de carga através de um material a uma determinada vazão sob condições de estado estacionário, e uma regressão linear pode ser realizada para determinar o coeficiente de permeabilidade (MONTROSS e MCNEILL, 2005).

O modelo empírico mais comumente utilizado é o proposto por Shedd (1953). Muitos projetistas usam o modelo Shedd para estimar a perda de carga em grãos a granel devido à sua simplicidade e facilidade. Shedd sugeriu o uso desta equação somente para faixas estreitas de fluxo de ar ($0,005 - 0,203 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$) devido à não linearidade do gráfico log – log (KASHANINEJAD e TABIL, 2009).

$$f_{ar} = a_2 \left(\frac{\Delta P}{L} \right)^{b_2} \quad (3)$$

A equação de Shedd é fácil de incorporar em modelos matemáticos a partir da previsão de padrões de pressão de ar em grãos armazenados. Embora a equação de Shedd seja empírica por natureza, ela tem um histórico teórico. Shedd sugeriu o uso da seguinte equação para descrever a relação entre a perda de carga no leito de grãos e a velocidade do ar (KASHANINEJAD e TABIL, 2009).

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = a_2 V^{b_2} \quad (4)$$

onde:

ΔP = Pressão do ar (Pa);

ΔL = Altura de camada (m);

a_2, b_2 = Constantes da equação;

V = Velocidade do ar (m s^{-1}).

Devido a limitação no fluxo de ar recomendado para a equação de Shedd (1953), Hukill & Ives (1955) desenvolveram um modelo, que explica a natureza não linear da resistência do fluxo de ar, e previram a perda de carga para uma faixa de fluxo de ar de

0,01 a 2,0 m³ s⁻¹ m⁻², e determinaram as constantes envolvidas na equação para vários grãos (AL-YAHYA e MOGHAZI, 1998). A *American Society of Agricultural and Biological Engineer* (ASABE) recomenda essa equação semi-empírica para representar o fluxo de ar em função dos dados de perda de carga (ASABE, 2007):

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{a_3 V^2}{\ln(1 + b_3 V)} \quad (5)$$

onde:

- ΔP = Pressão do ar (Pa);
- ΔL = Altura de camada (m);
- a_3, b_3 = Constantes da equação;
- V = Velocidade do ar (m s⁻¹).

O modelo Ergun é a soma das equações para fluxo de ar laminar e fluxo de ar turbulento. Para o caso do fluxo de ar laminar, a perda de carga é proporcional à velocidade, enquanto no caso de escoamento turbulento a perda de carga é proporcional à velocidade ao quadrado. Durante o escoamento do ar, através de leitos compactados, a transição do fluxo laminar para turbulento é muito gradual (PABIS et al. 1998)

A equação de Ergun é baseada na teoria da resistência de Reynold ao fluxo de um fluido. A equação de Ergun propõe que a perda de energia pela viscosidade $[(1 - \varepsilon)^2/\varepsilon^3]$ é proporcional a perda de energia cinética $[(1 - \varepsilon)/\varepsilon^2]$, em um leito poroso. Ergun (1952) sugere a seguinte equação geral para estimar perda de carga em leitos compactados (WENYIN e SOKHANSANJ, 1994):

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = a_4 V + b_4 V^2 \quad (6)$$

onde:

- ΔP = Pressão do ar (Pa);
- ΔL = Altura de camada (m);
- a_4, b_4 = Constantes da equação;
- V = Velocidade do ar (m s⁻¹).

Giner e Denisienia (1996) estudaram a perda de carga na massa de grãos de trigo em função da velocidade do ar, grau de umidade e teor de impurezas. Eles descobriram que a equação de Ergun forneceu uma estimativa melhor nos valores de perda de carga do que a equação de Shedd (1953) ou Hukill & Ives (1955). Molenda *et al.*, (2005b) usaram a equação de Ergun para prever a perda de carga na camada de três tipos de grãos em três graus de umidade. Esses autores concluíram que os dados coletados indicaram que a equação de Ergun pode ser aplicada com sucesso ao projeto e análise de sistema de aeração de grãos.

2.3. Compactação da massa de grãos a granel

Elaborar um inventário de peças fabricadas é um procedimento relativamente simples, entretanto fazer o inventário de um material agrícola a granel nem sempre é uma tarefa simples. A massa de grãos a granel consiste em uma matriz aleatória e complexa de partículas de formato irregular, com variação em suas propriedades, no tamanho e formato dos grãos, além da interferência de particularidades estruturais dos locais em que são depositados (THOMPSON, *et al.* 1987).

A massa específica aparente dos grãos a granel é um parâmetro comumente utilizado para estimar a massa de grãos presente no armazenamento a granel. Numerosos estudos envolvendo tanto grãos quanto particulados (pó) mostraram que a pressão causada pelo peso acumulado do material dominante em uma estrutura de armazenamento faz com que o material armazenado se comprima, o que resulta em um aumento na densidade aparente. Este aumento na massa específica aparente dos grãos causado pela pressão de sobrecarga do próprio material é comumente referido como compactação (TURNER, *et al.* 2016).

Em baixas pressões de sobrecarga, acredita-se que a maior parte do aumento na densidade seja causado pelo rearranjo de partículas e redução dos espaços vazios (THOMPSON e ROSS, 1983). Em altas pressões de sobrecarga, acredita-se que as forças que sustentam a porosidade intergranular desempenham um papel maior na resistência à compactação, e, eventualmente, os próprios grãos são comprimidos, e à medida que a pressão da sobrecarga aumenta, a compactação ocorre a uma taxa decrescente assintótica (THOMPSON, *et al.* 1987).

A equação de Janssen (JANSSEN, 1895) tem sido usada por mais de 100 anos para prever pressões dentro de estruturas de armazenamento para grãos a granel

(ROSS, *et al.* 1979). Para resolver a equação de Janssen, vários parâmetros são necessários, incluindo a relação de pressão lateral-vertical, o coeficiente de atrito do grão na parede do silo e a densidade do material. No trabalho feito com milho (ROSS, *et al.* 1979), as pressões verticais foram estimadas usando a forma diferencial da equação de Janssen, na qual as propriedades do material variaram com o grau de umidade e a pressão.

Thompson *et al.*, (1987) assumiram que a forma diferencial da equação de Janssen poderia ser usada não apenas para prever as pressões dentro de um silo, mas também como uma ferramenta de inventário para prever a compressibilidade do material armazenado. No inventário de grãos, normalmente é assumido que a relação de pressão lateral-vertical e o atrito com a parede do silo são constantes em toda a estrutura, e a densidade do material varia com a profundidade, causada por mudanças na pressão de sobrecarga do material.

A fim de resolver a equação de Janssen numericamente e estimar a massa total de grãos em uma estrutura, a densidade a granel deve ser resolvida em função da pressão de sobrecarga (TURNER, *et al.* 2016).

A transmissão de pressões criadas dentro de uma massa de materiais depende do caráter fundamental da partícula. Os fluidos e sólidos transmitem pressões de maneira diferente, nos fluidos, a pressão em qualquer ponto é igual em todas as direções. Os sólidos a granel (materiais granulares) são chamados de semifluidos. Eles não se comportam como fluidos nem como sólidos e exibem algumas propriedades do sólido (transmite a pressão para baixo) e algumas propriedades como o fluido (também transmite pressão lateralmente). Eles são compressíveis em certa medida, dependendo das características do material a granel, dos recipientes que os contêm e de alguns fatores externos (HAQUE, 2013).

Uma propriedade particular que afeta a estimativa da quantidade de grãos armazenados a granel é a precisão do peso volumétrico (massa específica aparente dos grãos) dentro da sua condição de depósito. A estimativa da quantidade de grãos (massa) com base em dados de massa específica aparente medido em laboratório resulta em uma subestimação bruta da massa específica aparente nas reais condições da massa de grãos em armazenamento (HAQUE, 2013).

Em um estudo realizado por Malm e Baker (1985), os fatores de compactação foram estimados medindo-se o total de acomodação dos grãos armazenados em um silo comercial, aos 7 e 14 dias após o enchimento e novamente aos 23 e 40 dias após o

enchimento. A defasagem máxima que ocorreu durante estes testes foi de 2,5%. Neste estudo, foram encontradas dificuldades em medir com precisão a altura da massa de grãos, pois ocorreram coletas de amostras durante o armazenamento e o amostrador pode ter perturbado as condições da superfície da massa de grãos. Entretanto, a partir deste estudo, foi proposto um conjunto de fatores de compactação para seis diferentes espécies de grãos.

Chang *et al.*, (1981; 1983) determinaram que quando um distribuidor foi utilizado, a densidade aparente da massa de trigo era de aproximadamente 5 a 9% maior do que a massa de trigo depositada sem a utilização de um distribuidor. Resultados semelhantes foram encontrados por Stephens e Foster (1976), que testaram diferentes tipos de distribuidores e verificaram que a densidade da massa de grãos variou de 12 a 19%. Outro ensaio, em menor escala, realizando o depósito manual dos grãos (grão a grão) em um recipiente aumentou a densidade da massa, pelo teste de peso, em média 3,7%.

Para estimar a quantidade de materiais granulares em uma estrutura de armazenamento, as informações sobre o material que está sendo armazenado e as condições, iniciais e finais, da operação de depósito devem ser considerados. Não apenas as superfícies e formas irregulares da massa de materiais granulares devem ser levadas em conta, mas também a variação nas propriedades de volume e de peso. Embora a geometria da estrutura de armazenagem e a forma da superfície granular possam ser medidas com precisão, a tarefa de estimar a variação nas propriedades do material é difícil, assim como as informações sobre como estão as condições do material enquanto depositado (THOMPSON, *et al.* 1987).

Segundo o FGIS, o teste de peso (*Test weight – TW*) é o procedimento utilizado para determinar a densidade de uma massa de grãos, em peso por bushel, e relaciona este parâmetro com o volume ocupado pela massa de grãos para estimar a quantidade de grãos armazenados a granel. Bhadra *et al.*, (2016) relata que a utilização da densidade da massa para estimar um estoque de grãos a granel, sem haver inspeção prévia da condição da massa armazenada, observando o teor de impurezas e a compactação da massa, tem ocasionado grandes problemas no inventário dos estoques.

A compactação de grãos armazenados a granel é influenciada por vários fatores, incluindo o tipo de grão, variação no tamanho e forma do grão, no grau de umidade, na massa específica aparente inicial, integridade física, e o mais importante, a pressão de sobrecarga que a massa de grãos está sujeita (THOMPSON e ROSS, 1983).

Segundo Montross e Mcneill (2005), mudanças na massa específica aparente no armazenamento de grãos a granel, devidas à compactação, devem ser observadas na estimativa de quantificação do produto dentro do silo. Thompson *et al.*, (1987) afirmam que a compactação, no armazenamento a granel, não ocorre de maneira semelhante, entretanto quando submetidos a uma mesma pressão de compactação, a massa de grãos de arroz e de aveia (grãos de tegumento áspero) expressaram uma variação maior de compactação em relação a massa de milho e sorgo (grãos de tegumento liso).

Pesquisas associadas com a compressibilidade dos grãos mostraram que a massa específica aparente dos grãos, no local e nas condições do armazenamento a granel, é preferencialmente uma função que relaciona o tipo de grão, a massa específica aparente inicial e a pressão de sobrecarga, e o grau de umidade quanto houver pouco produto e baixo teor de impurezas (THOMPSON, *et al.* 1987).

Turner *et al.*, (2016) faz uma extensa análise sobre os modelos utilizados para descrever as mudanças na densidade aparente de massa em relação ao tipo de grão, massa específica aparente inicial, pressão de sobrecarga e o grau de umidade. Cheng *et al.*, (2015; 2017) relata que as mudanças de massa específica aparente observadas para o milho e o para o trigo formam predominantemente devidas a pressão de compactação, promovendo o rearranjo dos grãos e a deformação da massa, e que nenhum padrão particular foi atribuído aos diferentes graus de umidade dos grãos.

A Tabela 1 mostra alguns dos modelos examinados por Turner *et al.*, (2016), que relacionam a massa específica aparente e a pressão de compressão, para a estimativa da massa específica aparente na compactação da massa de grãos.

Cheng *et al.*, (2017), após examinar os modelos relacionados por Tuner *et al.*, (2016), propõe ainda a aplicação de um modelo polinomial de segunda ordem (Eq. 7) capaz de correlacionar a massa específica aparente com a pressão de compactação.

Segundo Turner *et al.*, (2016) a equação 7 é a equação polinomial original usada por Thompson *et al.*, (1987) para modelar a relação pressão-densidade de vários grãos. A equação 8 representa uma proposta de modelo polinomial modificado e permite ao expoente do termo de segunda ordem envolver a variação da pressão de sobrecarga. A equação 9 representa uma forma modificada do modelo de Page, tradicionalmente aplicado com sucesso na secagem em camada fina de grãos (ASABE, 2014), a partir do proposto por Overhults *et al.*, (1973) a modificação no modelo de Page leva em conta os dois mecanismos primários que causam a compactação, a pressão de compactação e a redução da fração de vazios da massa de grãos.

$$D_i = a_5 P^2 + b_5 P + c_5 \quad (7)$$

Tabela 1 – Modelos que relacionam a massa específica aparente e a pressão de compactação

Referência	Modelos	
Thompson <i>et al.</i> (1987)	$D_i - D_0 = a_6 P + b_6 \sqrt{P} + c_6 M_c P$	(8)
Thompson <i>et al.</i> (1987) ^a	$D_i - D_0 = a_7 P + b_7 P^{d_7} + c_7 M_c P$	(9)
Overhults <i>et al.</i> (1973) ^a	$D_i - D_0 = (D_\infty - D_0) \left(1 - e^{(-a_8 P^{b_8})}\right) + c_8 M_c P$	(10)
Steffe (1992) ^a	$D_i - D_0 = a_9 (P^{b_9}) e^{(c_9 M_c)}$	(11)
Johanson e Cox (1989)	$D_i = D_0 (1 + a_{10} P)^{b_{10}} + c_{10} M_c P$	(12)

(^a) modelo modificado por Turner *et al.*, (2016)

onde:

D_i = Massa específica aparente final (kg m⁻³);

D_0 = Massa específica aparente inicial (kg m⁻³)

$a_{5...i}$ = Constante da equação;

$b_{5...i}$ = Constante da equação;

$c_{5...i}$ = Constante da equação;

P = Pressão de compactação (kPa);

M_c = Grau de umidade (decimal)

Os demais modelos, equações 11 e 12 foram retirados de outros campos de aplicação que tinham características semelhantes aos resultados de compressão observado para grãos. Estes, incluem o modelo de Steffe (1992) baseado na viscosidade dentro de um espessamento de cisalhamento fluido, com um limite de escoamento que, de forma geral, aumenta a densidade sob forças de compressão, e o modelo de Johanson e Cox (1989) utilizado para modelar as relações de densidade-tensão para particulados (pó) a granel (TURNER, *et al.* 2016).

Em estudos conduzidos por Thompson *et al.*, (1987) os efeitos produzidos pelas diferentes variedades de grãos e pressões foram muito mais expressivos que as variações produzidas pelo grau de umidade, para uma faixa de umidade entre 10 e 18% para o arroz, sorgo, milho e trigo, e para uma faixa entre 8 e 16% para a soja. O percentual de compactação foi determinado pela equação 13 (THOMPSON, *et al.* 1983), e a massa específica aparente da massa de grãos compactada foi determinada pela equação 14 (THOMPSON, *et al.* 1987).

$$D_i = D_0 \frac{h}{(h - \Delta h)} \quad (13)$$

onde:

D_i = Massa específica aparente final (kg m^{-3});

D_0 = Massa específica aparente inicial (kg m^{-3});

h = Altura inicial da camada de grãos (m);

Δh = Gradiente de altura da camada de grãos (m).

$$C_{pac} = \left(\left(\frac{\bar{D}_i}{\bar{D}_0} \right) - 1 \right) 100 \quad (14)$$

onde:

C_{pac} = Compactação da massa (%);

\bar{D}_i = Valor médio da massa específica aparente final (kg m^{-3});

\bar{D}_0 = Valor médio massa específica aparente inicial (kg m^{-3}).

Cheng *et al.*, (2015) estudando a compactação de massa do milho, aplicando pressões de 0 a 300 kPa, observou que mais de 95% da deformação da massa de grãos ocorreu na primeira hora, isso ocorreu porque a maior parte do rearranjo de partículas ocorreu no estágio inicial da compressão.

Neste estudo, a estabilização da deformação da massa de grãos foi considerada até a verificação de leituras de deformação menores que 0,2% em relação a deformação total e com base neste comportamento foi utilizada 12 horas de compressão para definir a estabilização da deformação da massa de grãos sob compressão.

Blight (2010) sugere que um ensaio de compactação da massa de grãos seja considerado válido se a diferença percentual entre a massa específica aparente obtida na compactação, entre repetições, não seja maior que 1%.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Pós-Colheita, Industrialização e Qualidade de Grãos (LabGrãos), do Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial, da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, da Universidade Federal de Pelotas (DCTA – FAEM – UFPEL).

3.1. Amostras de arroz

Foi utilizado arroz em casca (*Oryza sativa* L.) das classes de grão curto, longo e longo fino. Os grãos foram adquiridos em unidade armazenadora local com percentuais de umidade e de impurezas de aproximadamente 13% e até 2%, respectivamente, valores recomendados para o armazenamento conforme Instrução Normativa Nº 06 do Ministério da Agricultura, Pecuária e do Abastecimento (BRASIL, 2009b).

Uma fração de amostra de cada classe, isenta de impurezas, foi submetida a operação de descascamento para a verificação das dimensões dos grãos segundo aquelas registradas na legislação brasileira para o enquadramento de classes de grão curto, longo e longo fino (BRASIL, 2009b).

A Tabela 2 apresenta as dimensões obtidas dos grãos de arroz, descascados, e situam-se dentro das exigências de dimensões para as classes de grão de arroz longo fino, longo e curto.

Tabela 2 – Caracterização física das amostras de grãos de arroz, descascados, para o enquadramento de classes

Parâmetros (mm)	Classe do arroz		
	Longo fino	Longo	Curto
Comprimento	7,5 ± 0,07	7,1 ± 0,03	4,6 ± 0,07
Largura	2,1 ± 0,03	2,7 ± 0,04	2,9 ± 0,05
Espessura	1,8 ± 0,01	1,9 ± 0,02	2,0 ± 0,02

As amostras de grãos de arroz, em casca, das classes longo fino, longo e curto, com aproximadamente um quilograma foram submetidas a operação de pré-limpeza, em máquina de ar e peneira laboratorial, com posterior catação para a remoção total de materiais estranhos, impurezas, grãos descascados e quebrados.

3.2. Delineamento experimental

A tabela 3 apresenta o delineamento experimental, inteiramente casualizado, elaborado para o estudo da compactação da massa de grãos utilizando três classes de arroz, em casca, e três pressões para a compactação da massa de grãos.

Tabela 3 – Delineamento experimental utilizado na compactação de massa do arroz em casca

Tratamentos	Variáveis independentes		Variáveis dependentes
	Classe de arroz	Pressão (kPa)	
1	Longo fino	50	Grau de umidade
2			Teor de impurezas
3			Dimensões
.	Longo	130	Esfericidade
.			Diâmetro equivalente
.			Volume do grão
.	Curto	210	Área de superfície
.			Massa específica real
.			Proporção de área
10	Curto	210	Porosidade
11			Massa específica aparente
12			Ângulo de talude
			Peso de mil grãos
			Dinâmica de deformação da massa de grãos
			Percentual de compactação da massa de grãos
			Perda de carga na aeração dos grãos

3.3. Pressões de compactação

As pressões de compactação utilizadas foram obtidas considerando os limites de operação do sistema de compactação, observando o intervalo de 25 kPa a 300 kPa apresentadas por Cheng *et al.*, (2015; 2017).

Os ensaios de teste de pressões do sistema de compactação, desenvolvido para este estudo, revelaram que a pressão mínima foi de $50 \pm 2,5$ kPa e máxima de $210 \pm 2,5$ kPa, uma pressão com valor intermediário, de $130 \pm 2,5$ kPa foi adotada para fornecer três pontos de investigação.

3.4. Sistema de aeração

O sistema de aeração (Figura 2), é composto por um ventilador centrífugo, um registro de gaveta, e tubulações e conexões de PVC com diâmetro de 75 mm.

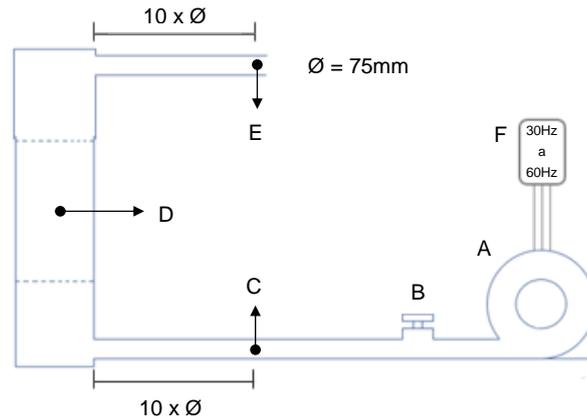


Figura 2 – Esquema do sistema de aeração: A, ventilador centrífugo; B, registro; C, ponto de coleta da perda de carga no sistema; D, câmara de compactação da massa de grãos; E, ponto de coleta da velocidade do ar; F, inversor de frequência.

O ventilador centrífugo, sem modelo comercial, possui vazão máxima de ar de aproximadamente $450 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, e uma pressão estática de aproximadamente 360 mmca (em frequência de 60 Hz). O sistema de aeração foi controlado por um quadro de comando contendo dispositivos de acionamento e proteção, e um inversor de frequência para o ajuste de rotação do ventilador, e conseqüentemente da velocidade do ar.

3.5. Fluxo de ar

Segundo Górnicki e Kaleta (2015), Shedd (1953) é o modelo mais comum e fácil de aplicar na previsão de padrões de perda de carga na aeração ar de grãos.

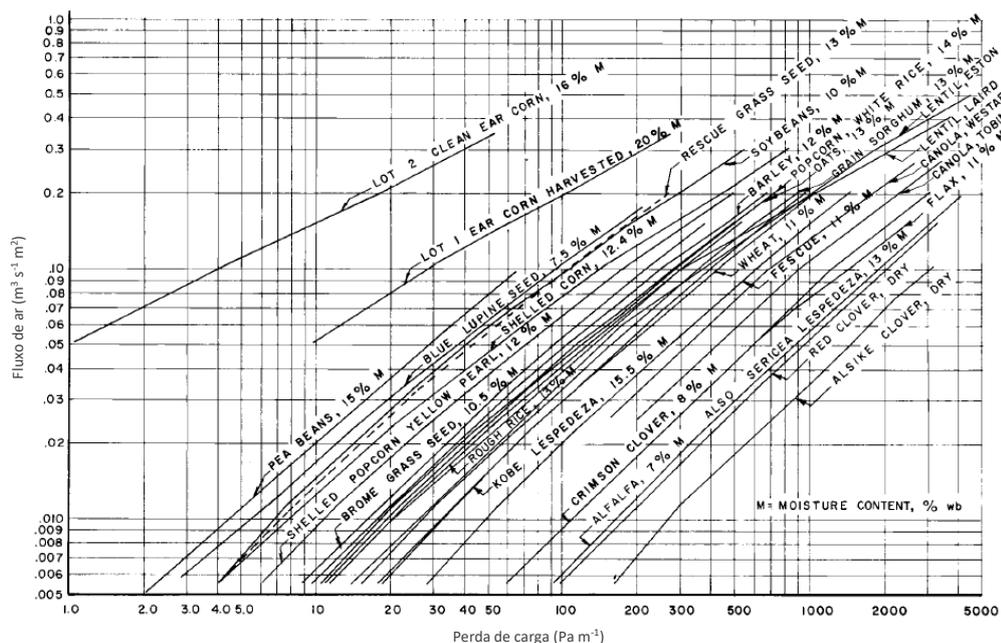


Figura 3 – Perda de carga no ar de aeração ocasionada pela massa de grãos
Fonte: (ASABE, 1998).

Muitos projetistas utilizam o modelo Shedd (1953) para estimar a perda de carga na aeração de grãos a granel, devido à sua simplicidade e facilidade de aplicação. Para a seleção dos fluxos de ar, foram realizados ensaios preliminares relacionando as limitações do sistema de aeração, em laboratório, e o intervalo de fluxo de ar apresentado no gráfico de Shedd (Figura 3). Foram selecionados 15 fluxos de ar, apresentados na Tabela 4, com amplitude de valores dentro do intervalo apresentado por Shedd.

Tabela 4 – Fluxos de ar selecionados para aeração da massa de grãos

Fluxo de ar programado ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^2$)														
0,03	0,05	0,07	0,09	0,1	0,15	0,2	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,8

3.6. Velocidade do ar

A velocidade do ar do sistema de aeração foi verificada através de um anemômetro digital de fio quente (Figura 4), modelo Testo 405-V1, com certificado de aferição emitido pela empresa Instrutemp.



Figura 4 – Anemômetro de fio quente modelo Testo 405-V1
Fonte: (INSTRUTEMP, 2018)

3.7. Verificação do fluxo de ar

Aproveitando a geometria concêntrica da haste de avanço do anemômetro de fio quente, foram realizados cinco orifícios equidistantes e de diâmetros ajustados para posicionar o fio quente, em diferentes pontos no perímetro da tubulação, com áreas transversais iguais, para a obtenção da velocidade média do ar na tubulação de exaustão (Figura 5), conforme o método do centroide sugerido por Steinbock *et al.*, (2016).

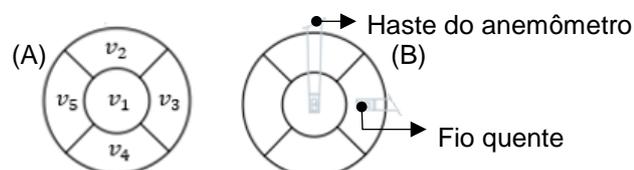


Figura 5 – Pontos de coleta da velocidade do ar (A) e posicionamento do anemômetro de fio quente (B)

O fluxo de ar praticado foi determinado, utilizando a equação 15, relacionando a velocidade média do ar de exaustão com a área transversal total da tubulação. A tomada de velocidades na tubulação de exaustão foi realizada a uma distância, em relação a massa de grãos, de dez vezes o diâmetro da tubulação.

$$\bar{v} = \left(\frac{f_{ar}}{A} \right) \quad (15)$$

onde:

f_{ar} = Fluxo de ar ($\text{m s}^{-1} \text{m}^{-2}$);

\bar{v} = Velocidade média do ar (m s^{-1});

A = Área transversal do duto (m^2).

3.8. Perda de carga

A perda de carga, ou queda de pressão, no sistema de aeração foi verificada utilizando um manômetro digital (Figura 6), modelo IT80MS, certificado e aferido pela Instrutemp. Para a obtenção da perda de carga no sistema foi efetuado um orifício, de diâmetro compatível com a mangueira do manômetro, localizado antes da passagem do ar pela massa de grãos e a uma distância de dez vezes o diâmetro da tubulação, para o acoplamento do anemômetro (LASSERAN, 1981; NAVARRO e NOYES, 2002).



Figura 6 – Manômetro digital de pressão diferencial
FONTE: (INSTRUTEMP, 2018)

3.9. Manejo do fluxo de ar no sistema aeração

Através de ensaios preliminares o controle do fluxo de ar foi inicialmente realizado através de um registro mecânico, com o inversor de frequência do motor do ventilador

ajustado para 30 Hz, e após atingir a limitação de abertura do registro a velocidade do ar passou a ser controlado pelo ajuste crescente da frequência. Foi utilizado ar em condição ambiente ($T = 28 \pm 3^\circ\text{C}$ e U.R. = $75 \pm 10\%$) para a aeração da massa de grãos.

3.10. Sistema pneumático de compressão

Para reproduzir a compactação da massa de grãos, em pequena escala, nas pressões desejadas, foi dimensionado um sistema pneumático de compressão (Figura 7 e 8), para receber simultaneamente três câmaras de compactação da massa de grãos.

O sistema pneumático é composto pelas seguintes partes: Chassis, parte de sustentação de todo o sistema e que permite a utilização das câmaras de compressão da massa de grãos, elaborado em aço, com espessura de 5mm e com seção transversal em “U”.

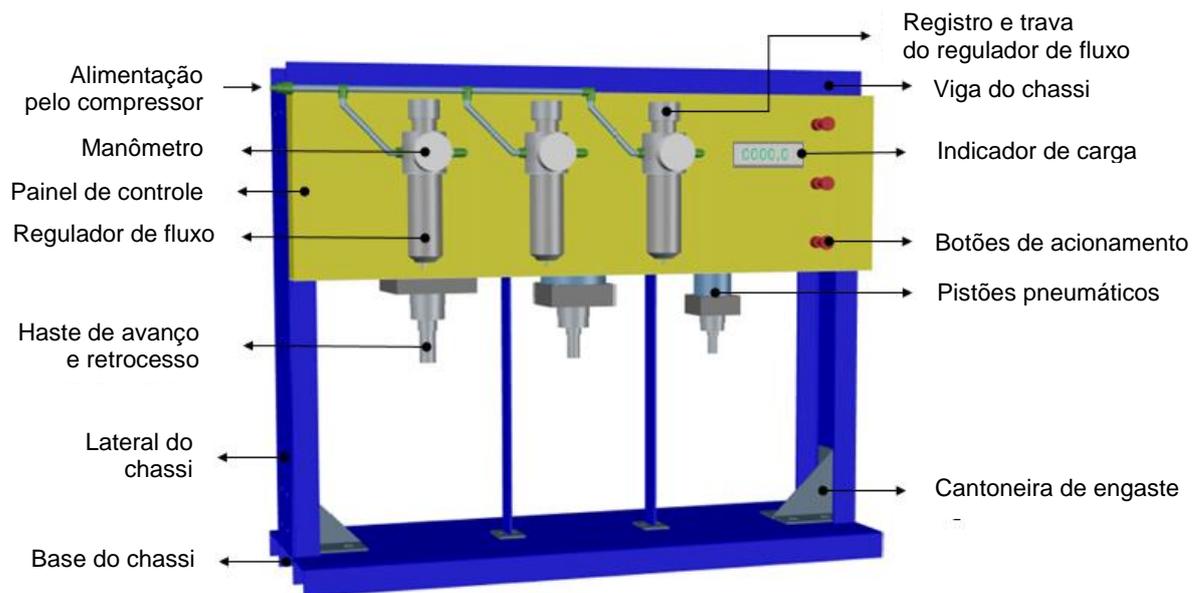


Figura 7 – Sistema pneumático de compressão, vista frontal, em perspectiva

O chassis é modulado, composto por quatro peças: 01 base, 02 laterais e 01 viga suspensa. A viga suspensa recebe três pistões pneumáticos, responsáveis por produzir as cargas de compressão. Os pistões pneumáticos, modelos KLEIN DNGUK (63-150-M; 100-150-M; e 150-150-M) de dupla ação, são fixados a viga suspensa de forma que sua haste móvel possibilite a instalação e a remoção da câmara de compressão sem a necessidade de desmontagem.

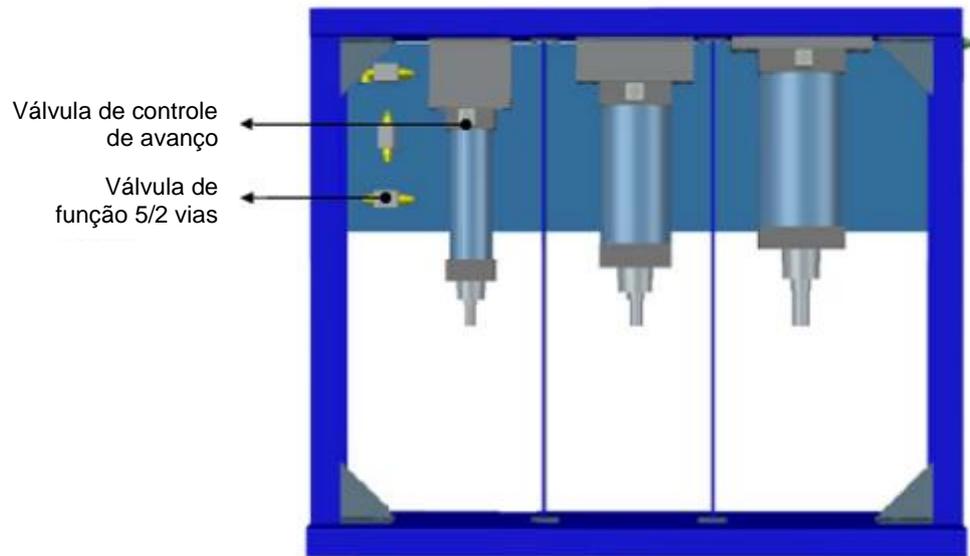


Figura 8 – Sistema pneumático de compressão, vista posterior, em perspectiva

O sistema pneumático é composto por conexões e tubulações de alta pressão, um regulador de fluxo de ar na linha principal, e para cada pistão reguladores individuais de fluxo de ar, válvulas individuais de controle de avanço da haste e válvulas individuais de função 5/2 vias, acionadas por botões independentes, tipo cogumelo/trava.

O sistema pneumático de compressão é pressurizado por um compressor de ar Schulz, modelo MSV10VL, com capacidade de 200 litros e pressão hidrostática de 1.421 kPa.

3.11. Câmara de compactação da massa de grãos

A câmara de compactação da massa de grãos (Figura 9) foi desenvolvida de forma a permitir, simultaneamente a compactação da massa de grãos e a passagem do fluxo de ar.

A câmara, com seção transversal cilíndrica, é composta por três partes principais: *Plenum* inferior, parte composta por um piso suspenso perfurado, permite o apoio da massa de grãos e a passagem do ar no sentido ascendente ao eixo vertical da massa de grãos; *Corpo*, é a parte que recebe a massa de grãos; *Plenum* superior, composto por uma base suspensa perfurada, é a parte que pressiona a massa de grãos e permite a passagem do ar no sentido ascendente ao eixo vertical da massa de grãos.

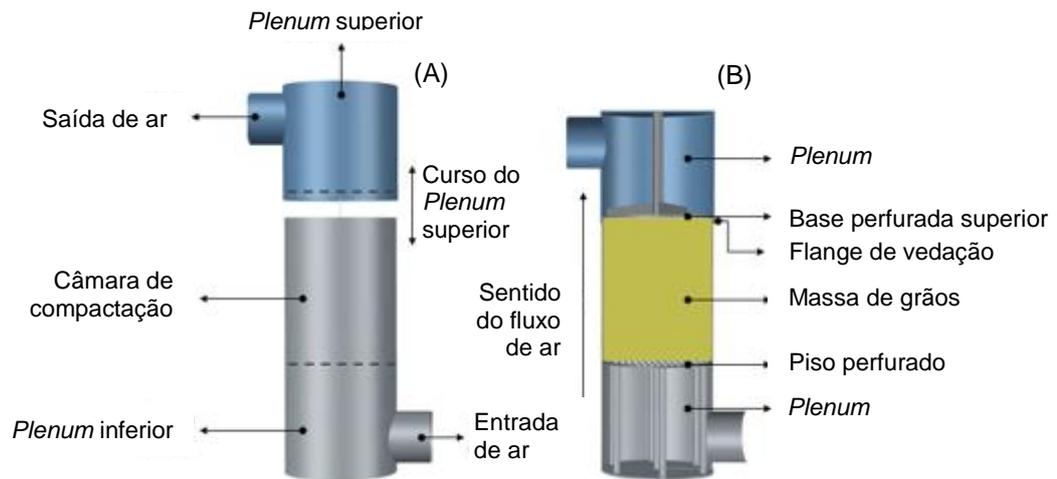


Figura 9 – Câmara de compactação da massa de grãos, vista lateral (A) e corte (B), em perspectiva

A câmara de compressão de massa foi dimensionada, observando o dispositivo proposto por Molenda *et al.*, (2005b) com adaptações, e foi construída por uma empresa metalúrgica local. Todos os principais componentes da câmara de compressão foram elaborados em tubo de aço liso com espessura 3,6 mm.

3.12. Calibração das pressões de compactação

Para a realização da calibração do sistema pneumático foi utilizado uma célula de carga (Figura 10, A), de liga de alumínio, modelo CSL/ZL – 2T com sensibilidade de $2 \pm 0,02 \text{ mv V}^{-1}$.

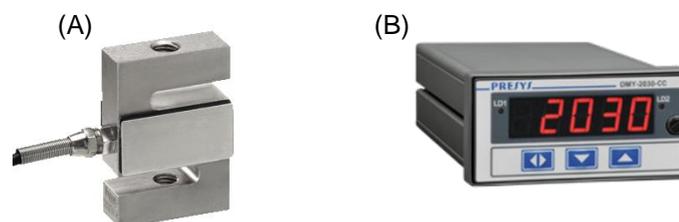


Figura 10 – Célula de carga (A) e indicador digital (B)

A célula de carga foi posicionada logo abaixo da haste de avanço de cada pistão, para a leitura da carga de compressão, e um indicador digital de quatro dígitos (Figura 10, B), modelo MMK2030 com elevado nível de precisão.

Após a pressurização do sistema pneumático e o acionamento do pistão, através do ajuste gradual das válvulas reguladoras de fluxo, foi possível obter, pelo indicador digital, a carga de compressão exercida pela haste do pistão sobre a célula.

Para as pressões de compactação selecionadas, de 50 kPa, 130 kPa e 210 kPa, foram necessárias às aplicações de cargas de 103 kgf, 270 kgf e 430 kgf, respectivamente. As calibrações das cargas de compressão foram realizadas em triplicada, para cada pistão, com uma variação de aproximadamente três quilogramas.

A Figura 11 apresenta um fluxograma que expressa as principais etapas do processo de calibração das cargas de compressão aplicadas pelos pistões para produzir as pressões de compactação da massa de grãos.

A manutenção da pressurização do sistema pneumático foi automática, através do pressostato do compressor, regulado para acionar sempre com pressão maior que a necessária para a manutenção das pressões de compressão.

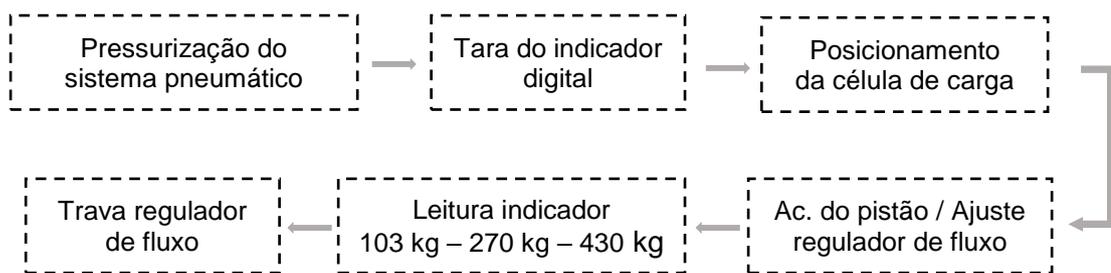


Figura 11 – Fluxograma do processo de calibração do sistema pneumático

3.13. Preparação da câmara de compactação

Antes de ingressar com os grãos na câmara de compressão, o compartimento de acomodação da massa de grãos foi limpo, polido manualmente com massa automotiva nº 2, e lubrificado com vaselina sólida pura, buscando assim prevalecer no sistema as forças de atrito entre os grãos e minimizar as forças de atrito entre os grãos e as paredes da câmara.

Foram utilizados, aproximadamente, um quilograma de grãos formando uma camada de aproximadamente 73 ± 5 mm de espessura, medida dez vezes maior que a maior dimensão dos grãos, conforme recomendado por Blight (2010).

O ingresso da massa de grãos na câmara de carga foi realizado por gravidade utilizando um regulador de fluxo (tubo de PVC com abertura por guilhotina) até aproximadamente um a dois centímetros da borda da câmara.

Após o nivelamento da massa, utilizando a base perfurada do *plenum* superior, foi inserido na superfície da massa de grãos, entre os grãos e a parede da câmara, um anel de borracha dura com seção transversal em triângulo retângulo, para evitar a acomodação de grãos entre a parede da câmara e a base perfurada do *plenum* superior, durante a compressão, e a ocorrência preferencial de fluxo de ar junto a parede da câmara durante a aeração.

Na sequência, foram realizadas seis medições do desnível da massa de grão em relação a borda da câmara de compactação, e por diferença em relação a profundidade do piso, foi possível determinar a espessura da camada de grãos.

Com a massa de grãos nivelada e o anel de borracha instalado, o *plenum* superior foi apoiado e centralizado sobre a massa de grãos, nesta etapa foi necessário estabelecer a direção das conexões de tubulação e marcar, no corpo do *plenum* superior e no corpo da câmara de compactação, uma referência física para a tomada das medidas de avanço do *plenum* superior durante a compactação da massa de grãos.

A Figura 12 apresenta um corte ampliado da sessão longitudinal da câmara de compactação detalhando a instalação do anel de borracha dura para a vedação interna e bloqueio da massa de grãos entre a parede da câmara e a base perfurada superior.

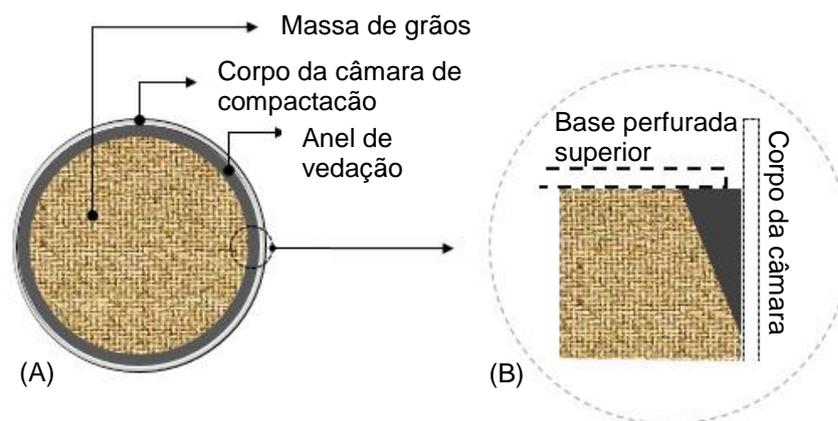


Figura 12 – Detalhe da instalação do anel de vedação interno, corte transversal da câmara (A) e corte longitudinal ampliado da câmara (B)

3.14. Deformação da massa de grãos e massa específica aparente na compactação

O acompanhamento da evolução da deformação na espessura da massa de grãos, durante o processo de compactação, foi realizado determinando o percentual de deformação a cada momento de verificação da massa específica aparente.

Conforme Cheng *et al.*, (2015) a compactação da massa torna-se estável quando se verifica que a diferença, consecutiva, entre as variações de deslocamento da massa de grãos for menor que 0,2% em relação a deformação total produzida. A massa específica aparente da massa de grãos a granel, na compactação, foi determinada utilizando a equação 13.

Foi considerado um ensaio válido, quando as diferenças entre triplicadas da massa específica aparente resultante da compactação apresentaram valores menores que 1%, conforme proposto por Blight (2010).

3.15. Ensaio de compactação da massa de grãos

Após a calibração do sistema pneumático, o preparo e a carga da câmara de compactação, a mesma foi posicionada abaixo dos pistões, a seguir o *plenum* superior foi fixado na haste do cilindro e nivelado.

Com o auxílio da válvula de avanço da haste o *plenum* superior foi posicionado bem próximo a massa de grãos permitindo sua centralização concêntrica com as paredes da câmara de compactação.

Em seguida, os pontos demarcados no corpo do *plenum* superior e da câmara de compactação são alinhados, com o auxílio de um nível para a correta orientação.

Uma tira de fita adesiva foi fixada às duas partes para evitar o desalinhamento dos pontos por movimentos de rotação do *plenum* superior ao iniciar a compactação. Após decorrido um minuto do início da compactação a fita adesiva é removida e a primeira leitura de deslocamento do *plenum* superior foi realizada após 5 minutos. A Figura 13 apresenta um fluxograma que expressa as principais etapas para o ensaio de compactação da massa de grãos.

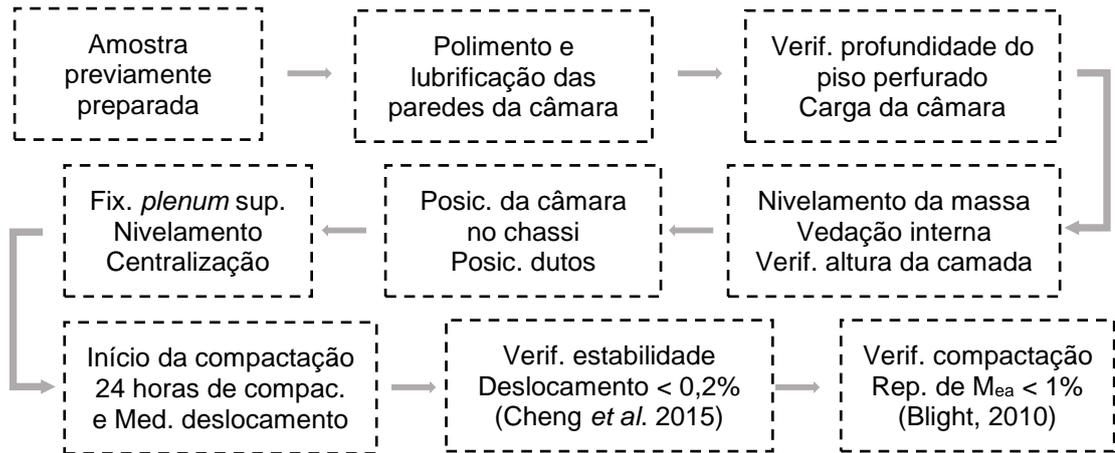


Figura 13 – Fluxograma das principais etapas para o ensaio de compactação da massa de grãos

3.16. Ensaio de perda de carga na compactação da massa de grãos

Decorridas 24 horas após o início da compactação da massa de grãos, e verificada a estabilidade da compactação, sendo o referido período o dobro do tempo utilizado para a compactação da massa de trigo, relatado por Cheng *et al.*, (2017), o transpasse entre o *plenum* superior e o corpo da câmara de compressão foi vedado, utilizando uma fita adesiva.

Para verificar a efetividade da vedação, o sistema de aeração foi regulado para sua maior capacidade e potência, na busca por vazamentos. Após confirmar a integridade da vedação da câmara de compactação, o sistema foi regulado para operar dentro dos fluxos de ar programados, inicialmente utilizando o registro manual e posteriormente, se necessário, ajustando pelo inversor de frequência.

A Figura 14 apresenta um fluxograma das principais etapas para o ensaio de perda de carga da massa de grãos compactada.

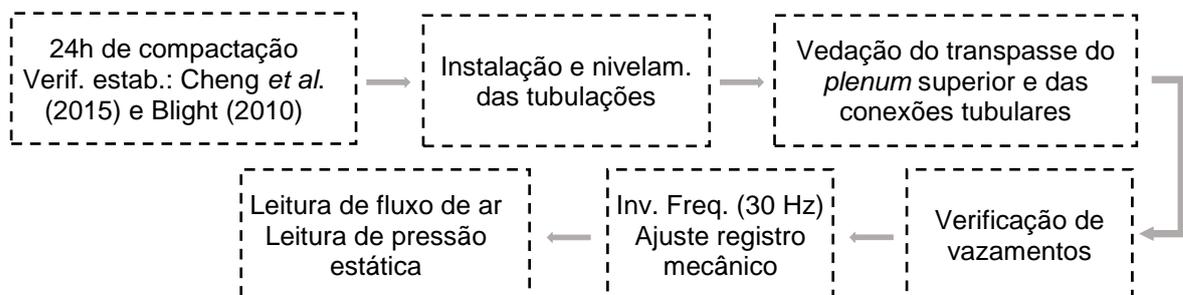


Figura 14 – Fluxograma das principais etapas para o ensaio de perda de carga da massa de grãos compactada

3.17. Dinâmica de deformação da massa de grãos em compactação

Imediatamente após a carga e o nivelamento dos grãos foram obtidas, em dois sentidos transversais, seis medidas de desnível da massa de grãos em relação a borda do corpo da câmara, e de posse da medida de profundidade do piso perfurado no *plenum* inferior, por diferença, foi possível determinar a espessura da camada de grãos, e assim atribuir esta posição como o estágio inicial da deformação da massa em compactação.

No corpo da câmara e na borda do *plenum* superior, externamente, foram utilizados dois pontos físicos para a coleta de medidas utilizando um paquímetro digital com precisão de 0,01 milímetros, ao longo do tempo de compressão da massa de grãos.

Durante o processo de compressão, as medidas de altura entre o *plenum* superior e o corpo da câmara de compressão foram verificadas nas primeiras 12 horas conforme proposto por Cheng *et al.*, (2015) e adicionado 12 horas para última coleta.

3.18. Avaliações

3.18.1. Grau de umidade

O teor de água dos grãos foi determinado segundo normas da ASAE (2000), em estufa com circulação natural de ar durante 24 horas a 105°C, com 10 gramas de grãos por cápsulas de alumínio.

3.18.2. Propriedades físicas

Com a finalidade de caracterizar as diferentes classes do arroz, em casca, foram realizadas investigações sobre algumas propriedades físicas dos grãos, conforme apresentado na Tabela 5.

A determinação das dimensões de comprimento, largura e espessura dos grãos foi realizada, aleatoriamente sobre 100 grãos, utilizando um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm (KASHANINEJAD e TABIL, 2008).

O peso de mil grãos foi determinado através da média obtida pela pesagem de cinco amostras, cada uma composta pela contagem aleatória de 50 grãos, o valor médio foi multiplicado por 20 e o peso de mil grãos expresso em gramas (MANSOURI, *et al.* 2017).

Tabela 5 – Propriedades físicas e métodos utilizados para a caracterização física dos grãos

Propriedade física	Referência	Equação	
Esfericidade		$E_{sf} = \frac{(C L' E)^{1/3}}{L}$	(16)
Diâmetro equivalente		$D_{eq} = \left(C \frac{(L' + E)^2}{4} \right)^{1/3}$	(17)
Volume	Varnamkhasti, <i>et al.</i> (2008)	$V_g = 0,25 \left[\left(\frac{\pi}{6} \right) C (L' + E)^2 \right]$	(18)
Proporção de área		$P_{ra} = \frac{L'}{C}$	(19)
Área de superfície		$S = \frac{\pi B L'^2}{(2 L' - B)}$	(20)
		$B = \sqrt{(L' E)}$	(21)
Ângulo de talude	Kashaninejad, <i>et al.</i> (2008)	$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{h}{\ell} \right)$	(22)
Massa específica aparente	Brasil, (2009a)	$m_{ea} = \frac{m_g}{V_L}$	(23)
Massa específica real	Botelho, <i>et al.</i> (2018)	$m_{er} = \frac{m_g}{(V_i - V_f)}$	(24)
Porosidade	Mohsenin, (1986)	$\varepsilon = \left(1 - \frac{m_{ea}}{m_{er}} \right) 100$	(25)

onde:

- C = Comprimento (mm)
- L' = Largura (mm)
- E = Espessura (mm)
- h = Altura (m)
- ℓ = Comprimento (m)
- m_g = Massa de grãos (kg)
- V_L = Volume do cilindro (m³)
- V_i = Volume do balão volumétrico (m³)
- V_f = Volume de tolueno para completar o balão volumétrico (m³)
- E_{sf} = Esfericidade (adimensional)
- D_{eq} = Diâmetro equivalente (mm)
- V_g = Volume (mm³)
- P_{ra} = Proporção de área (adimensional)
- S = Área de superfície (mm²)
- θ = Ângulo de talude (°)
- m_{ea} = Massa específica aparente (kg m³)
- m_{er} = Massa específica real (kg m³)
- ε = Porosidade (%)

3.18.3. Curvas de perda de carga

As curvas de perda de carga foram construídas em função do fluxo de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^2$) utilizando a perda de carga (Pa m^{-1}) provocada pela massa de grãos subtraída da perda de carga provocada pelos componentes do sistema de aeração.

3.18.4. Percentual de compactação e massa específica aparente na compactação

O percentual de compactação e a massa específica aparente da massa de grãos compactada, foram determinados utilizando as equações apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Equações utilizadas na determinação do percentual e da massa específica aparente da massa de grãos compactada

Referência	Equação
Thompson, <i>et al.</i> (1983)	$D_i = D_0 \frac{h}{(h - \Delta h)}$
Thompson, <i>et al.</i> (1987)	$C_{pac} = \left(\left(\frac{\bar{D}_i}{\bar{D}_0} \right) - 1 \right) 100$

3.19. Análise estatística

Os dados experimentais de massa específica aparente, nas diferentes pressões de compactação, foram analisados em função do desempenho dos modelos relacionados por Tuner *et al.*, (2016) e o modelo proposto por Cheng *et al.*, (2017) apresentados na Tabela 7.

Os dados experimentais de perda de carga nas diferentes pressões de compactação foram analisados em função do desempenho dos modelos de Shedd, Hukill & Ives e Ergun, apresentados na Tabela 8.

Tabela 7 – Modelos utilizados para analisar a massa específica aparente do arroz, em casca, na compactação da massa de grãos

Referência	Modelo
Overhults, <i>et al.</i> (1973) ^a	$D_i - D_0 = (D_\infty - D_0) \left(1 - e^{(-a_7 P^{b_7})} \right) + c_7 M_c P$
Thompson, <i>et al.</i> (1987)	$D_i - D_0 = a_5 P + b_5 \sqrt{P} + c_5 M_c P$
Thompson, <i>et al.</i> (1987) ^a	$D_i - D_0 = a_6 P + b_6 P^{d_6} + c_6 M_c P$
Johanson e Cox (1989)	$D_i = D_0 (1 + a_9 P)^{b_9} + c_9 M_c P$
Steffe (1992) ^a	$D_i - D_0 = a_8 (P^{b_8}) e^{(c_8 M_c)}$
Cheng (2017)	$D_i = a_{10} P^2 + b_{10} P + c_{10}$

(^a) modelo modificado por Turner *et al.*, (2016)

Tabela 8 – Modelos utilizados para analisar a perda de carga na aeração da massa de grãos compactada

Referência	Modelo
Darcy (1856)	$\frac{\Delta P}{\Delta L} = a_1 V$
Ergun (1952)	$\frac{\Delta P}{\Delta L} = a_4 V + b_4 V^2$
Shedd (1953)	$\frac{\Delta P}{\Delta L} = a_2 V^{b_2}$
Hukill & Ives (1955)	$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{a_3 V^2}{\ln(1 + b_3 V)}$

Cada modelo, alimentado pelos dados experimentais, foi examinado utilizando a análise de regressão não linear pelo método *Quasi-Newton*. O desempenho dos modelos foi avaliado pela grandeza do coeficiente de determinação (R^2) e pelo menor erro médio relativo (EMR, %) abaixo de 10%, obtido pela Eq. 26, proposta por El-khaiary e Malash (2011).

$$\text{EMR (\%)} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{(\text{Predictive}_i - \text{Experimental}_i)}{\text{Experimental}_i} \right] \quad (26)$$

Uma análise de variância (ANOVA) utilizando o teste HSD de Tukey, a 95% de significância ($p < 0,05$), foi realizada para examinar as diferenças nas características físicas dos grãos, a influência da pressão de compactação sobre a massa específica aparente e sobre o percentual de compactação. A análise estatística de variância e de regressão não linear formam conduzidas utilizando o software Statistica 6.0 (StatSoft).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização física dos grãos de arroz

A Tabela 9 apresenta as variações nos parâmetros de propriedades físicas entre as classes de arroz longo fino, longo e curto, em casca. Segundo Molenda *et al.*, (2005a) dentre os vários fatores que influenciam a resistência ao fluxo de ar através da massa de grãos, a massa específica aparente é reconhecida como um fator determinante. Desta forma, a caracterização física dos grãos (Tabela 9) foi apresentada em função da ordenação crescente dos valores de massa específica aparente.

Pelos resultados obtidos, é possível perceber que os grãos das diferentes classes de arroz utilizados, apresentam diferença significativa em pelo menos uma das dimensões axiais. Entretanto, apesar da pouca distinção significativa, entre os grãos de cada classe, outras 7 propriedades físicas apresentaram diferenças significativas.

Tabela 9 – Caracterização física dos grãos de arroz, em casca

Parâmetros	Longo fino	Longo	Curto
Comprimento (mm)	9,6 ± 0,22 ^a	9,5 ± 0,19 ^a	6,69 ± 0,14 ^b
Largura (mm)	2,3 ± 0,03 ^b	3,2 ± 0,07 ^a	3,1 ± 0,06 ^a
Espessura (mm)	1,9 ± 0,00 ^c	2,2 ± 0,03 ^a	2,1 ± 0,03 ^b
Esfericidade (adm)	0,37 ± 0,00 ^c	0,42 ± 0,00 ^b	0,53 ± 0,00 ^a
Diâmetro equivalente (mm)	3,5 ± 0,04 ^b	4,1 ± 0,06 ^a	3,6 ± 0,06 ^b
Área de superfície (mm ²)	36,0 ± 0,92 ^b	47,0 ± 1,52 ^a	33,9 ± 1,16 ^b
Proporção de área (adm)	0,24 ± 0,00 ^c	0,33 ± 0,00 ^b	0,47 ± 0,00 ^a
Volume do grão (mm ³)	23,05 ± 0,79 ^b	37,3 ± 1,81 ^a	24,6 ± 1,28 ^b
Massa esp. aparente (kg m ⁻³)	617,8 ± 0,98 ^c	621,3 ± 0,93 ^b	634,2 ± 1,09 ^a
Massa esp. real (kg m ⁻³)	1450 ± 64,3 ^a	1386 ± 58,2 ^b	1289 ± 63,5 ^c
Porosidade (%)	57,4 ± 0,30 ^a	55,2 ± 0,17 ^b	50,8 ± 0,19 ^c
Ângulo de talude (°)	35,8 ± 0,225 ^a	33,2 ± 0,457 ^b	30,9 ± 0,501 ^c
Teor umidade (%)	13,4 ± 0,153 ^a	12,8 ± 0,306 ^a	12,8 ± 0,219 ^a
Peso de mil grãos (g)	27,6 ± 0,081 ^b	36,2 ± 0,051 ^a	25,85 ± 0,046 ^c

*Médias aritméticas simples, de três determinações ± desvio padrão, seguidas por letras iguais, na mesma linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$).

Investigações que estudam a influência do grau de umidade sobre as propriedades físicas dos grãos, como Bhattacharya *et al.*, (1972), Stuart (1980) e Karababa (2006), relatam que o aumento desta variável pode provocar incrementos nos valores de algumas propriedades e redução em outras.

A verificação de não ocorrência de diferença significativa nos valores de grau de umidade, entre as classes de arroz, e pelo comportamento significativamente distinto das propriedades de esfericidade, proporção de área, massa específica aparente, massas

específica real, massa específica aparente, porosidade, ângulo de talude e peso de mil grãos, é possível atribuir que às características fenotípicas ocasionaram as diferenças entre as classes de arroz utilizadas neste estudo, e que apresentam grãos distintos.

Além disso, pesquisas que relacionam a compactação da massa de grãos (THOMPSON, *et al.* 1987) em função do grau de umidade e do teor de impurezas, mostraram que a influência destes parâmetros somente é relevante em pressões de compactação menores que 25 kPa, o que não se verifica no presente estudo pois a menor pressão de compactação é de aproximadamente 50 kPa.

Cheng *et al.*, (2017) estudando diferentes teores de umidade e pressões de compactação de massa do trigo indica que mesmo que o grau de umidade dos grãos afete a massa específica aparente inicial, o mesmo não é verificado sobre a massa específica aparente final, resultante da compactação.

Além disso, as mudanças de massa específica aparente decorrente da compactação de massa do milho (CHENG, *et al.* 2015), assim como revelado para na investigação com grãos de trigo (CHENG, *et al.* 2017), foram predominantemente devido a pressão de compactação.

4.2. Influência da compactação de massa sobre a massa específica aparente dos grãos

A Tabela 10 apresenta a modificação da massa específica aparente inicial, provocada pela pressão de compactação da massa de grãos, para o arroz das classes longo fino, longo e curto, em casca.

Pelo comportamento nos valores de massa específica aparente apresentados na Tabela 10, é possível observar que há diferenças significativas entre os valores médios obtidos para a massa específica aparente em função das diferentes pressões de compactação e das classes de arroz.

O aumento da pressão de compactação elevou a massa específica aparente inicial, este comportamento está de acordo com o relatado por Cheng *et al.*, (2015; 2017).

Tabela 10 – Influência da pressão de compactação sobre a massa específica aparente do arroz, em casca

Pressão de compactação (kPa)	Massa específica aparente (kg m ⁻³)		
	Longo fino	Longo	Curto
0	617,80 ± 0,98 ^{dC}	621,32 ± 0,93 ^{dB}	634,20 ± 1,09 ^{dA}
50	642,07 ± 2,72 ^{cA}	645,49 ± 3,62 ^{cA}	647,25 ± 2,44 ^{cA}
130	661,98 ± 1,46 ^{bC}	673,89 ± 1,61 ^{bB}	681,40 ± 2,71 ^{bA}
210	685,52 ± 3,48 ^{aB}	696,01 ± 3,96 ^{aB}	715,15 ± 4,31 ^{aA}

*Médias aritméticas simples, de três determinações ± desvio padrão, seguidas por letras iguais, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$).

A ocorrência de diferença significativa entre as pressões de compactação, está de acordo com o comportamento verificado na literatura e que apresenta a pressão de compactação como um fator determinante na compactação da massa de grãos.

A pouca distinção significativa encontrada entre as classes pode ser atribuída a variação dos valores de massa específica aparente inicial em relação aos gerados pela pressão de compactação. Este comportamento também é verificado nas investigações realizadas por Cheng *et al.*, (2015; 2017), que alterou a massas específica inicial dos grãos de milho e trigo em função do grau de umidade.

No estudo descritos por Cheng *et al.*, (2015) é possível verificar para o milho valores decrescentes, e próximos, de massa específica aparente final, na mesma pressão de compactação, de $801,9 \pm 2,4 \text{ kg m}^{-3}$ e $801,2 \pm 1,6 \text{ kg m}^{-3}$ para massas específicas aparentes iniciais de, respectivamente, $758,3 \pm 0,3$ e $741,2 \pm 0,2 \text{ kg m}^{-3}$, e valores crescentes de massa específica aparente final de $789,4 \pm 1,0 \text{ kg m}^{-3}$ e $790,5 \pm 1,7 \text{ kg m}^{-3}$, para massas específicas aparentes iniciais de, respectivamente $741,2 \pm 0,2 \text{ kg m}^{-3}$ e $722,1 \pm 0,2 \text{ kg m}^{-3}$.

Um comportamento muito similar, foi verificado para o trigo (CHENG, *et al.* 2017) em diferentes pressões de compactação, com valores de massa específica aparente final de $812,60 \text{ kg m}^{-3}$ e $812,70 \text{ kg m}^{-3}$ para massas específicas aparentes iniciais de, respectivamente $785,12 \text{ kg m}^{-3}$ e $738,16 \text{ kg m}^{-3}$, e valores de massa específica aparente final de $827,73 \text{ kg m}^{-3}$ e $830,2 \text{ kg m}^{-3}$ para massa específica aparente inicial de, respectivamente $792,61 \text{ kg m}^{-3}$ e $785,12 \text{ kg m}^{-3}$.

A Tabela 11 apresenta os percentuais de compactação da massa de grãos para diferentes pressões de compactação e diferentes classes de arroz, obtidas segundo a equação 14, proposta por Thompson *et al.*, (1987).

Tabela 11 – Percentuais de compactação da massa de grãos de arroz

Pressão de compactação (kPa)	Percentuais de compactação		
	Longo fino	Longo	Curto
50	3,92 ± 0,44 ^{cA}	3,89 ± 0,61 ^{cA}	2,05 ± 0,22 ^{cB}
130	7,15 ± 0,14 ^{bB}	8,46 ± 0,33 ^{bA}	7,44 ± 0,80 ^{bB}
210	10,96 ± 0,39 ^{aB}	12,02 ± 0,59 ^{aAB}	12,76 ± 0,82 ^{aA}

*Médias aritméticas simples, de três determinações ± desvio padrão, seguidas por letras iguais, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$).

Pelo comportamento nos valores do percentual de compactação da massa de grãos, é possível observar que há diferenças significativas entre as diferentes pressões de compactação e entre as classes de arroz. O aumento da pressão de compactação elevou o percentual de compactação da massa de grãos, este comportamento é correspondente ao verificado no aumento da massa específica aparente apresentada na Tabela 10.

Conseqüentemente, pela relação direta das massas específicas aparentes (Tabela 10) na determinação do percentual de compactação (Tabela 11), o comportamento de diferenciação significativa se manteve semelhante na maioria dos tratamentos, entretanto ocorreram discrepâncias sutis entre as classes, isto é decorrente da amplitude entre as massas específicas aparentes iniciais, na obtenção dos valores em percentuais. Outro fator considerado é que as massas específicas aparentes iniciais, entre as classes de arroz longo fino, longo e curto, apresentam uma variação decorrente das características fenotípicas de cada classe de arroz, e não de uma interferência controlada ou proporcional sobre os grãos.

A amplitude e o comportamento dos valores, no percentual de compactação da massa de grãos obtidos para o arroz, em casca, são semelhantes aos relatados por Cheng *et al.*, (2015; 2017). O referido autor, estudando a influência da pressão de compactação e o grau de umidade na massa de grãos de milho e trigo, encontrou valores de 10,52% e 10,83% para uma pressão de compactação de 250 kPa com aproximadamente 40 kPa a mais em relação a maior pressão de compactação de 210 kPa (210,05 kPa) aplicada ao arroz, neste estudo.

A relação entre os maiores valores percentuais de compactação de massa apresentados para o arroz e os maiores valores percentuais de compactação encontrados para o milho e o trigo, está de acordo com o comportamento apresentado por Thompson *et al.*, (1987) que apresenta, nas mesmas condições de compactação,

percentuais de compactação da massa de grãos maiores para o arroz em casca, seguido do trigo macio de inverno, do trigo duro de inverno, da soja, do sorgo e do milho.

A maior pressão de compactação aplicada ao arroz na investigação de Thompson *et al.*, (1987) foi de aproximadamente 137 kPa e resultou em uma compactação de massa correspondente a 9,6%, este percentual e pressão de compactação são compatíveis para o arroz da classe longo, na pressão de compactação de 130 kPa e semelhante com o intervalo de valores encontrados para o arroz da classe longo fino entre as pressões de 130 kPa e 210 kPa, testadas neste estudo.

4.2.1. Dinâmica do processo de compactação

Os gráficos de dinâmica do processo de compactação da massa de arroz, em casca, foram expressos em percentuais de deslocamento da deformação da camada grãos em função do tempo de compactação, até o momento de estabilização.

A soma dos valores percentuais de deslocamento reflete a deformação total ocorrida na camada de grãos, decorrente da pressão de compactação. Para descrever o comportamento, assintótico, do avanço da deformação da camada de grãos foi uma função polinomial invertida, de terceira ordem (Eq. 27).

$$f(y) = y_i + \left(\frac{a}{x}\right) + \left(\frac{b}{x^2}\right) + \left(\frac{c}{x^3}\right) \quad (27)$$

Na Figura 15 é apresentado a dinâmica de deformação da massa de grãos de arroz longo fino, em casca, utilizando pressões de compactação de 50 kPa, 130 kPa e 210 kPa.

Através do comportamento no percentual de deformação da massa de arroz longo fino, apresentado na Figura 15, na pressão de compactação de 50 kPa, verifica-se que aproximadamente 87% da deformação ocorreu já aos 5 minutos de compactação, e com uma taxa de deformação decrescente e de baixa amplitude, aos 30 minutos foi houve a ocorrência de 99% da deformação total, e demandou um tempo de estabilização de aproximadamente 60 minutos.

Com um tempo de estabilização maior, de aproximadamente 120 minutos, o percentual de deformação da massa, do arroz longo fino, na pressão de compactação de 130 kPa, foi de aproximadamente 90%, com um comportamento semelhante ao

verificado para a pressão de compactação anterior, aos 30 minutos foi verificado a ocorrência de 98% da deformação total.

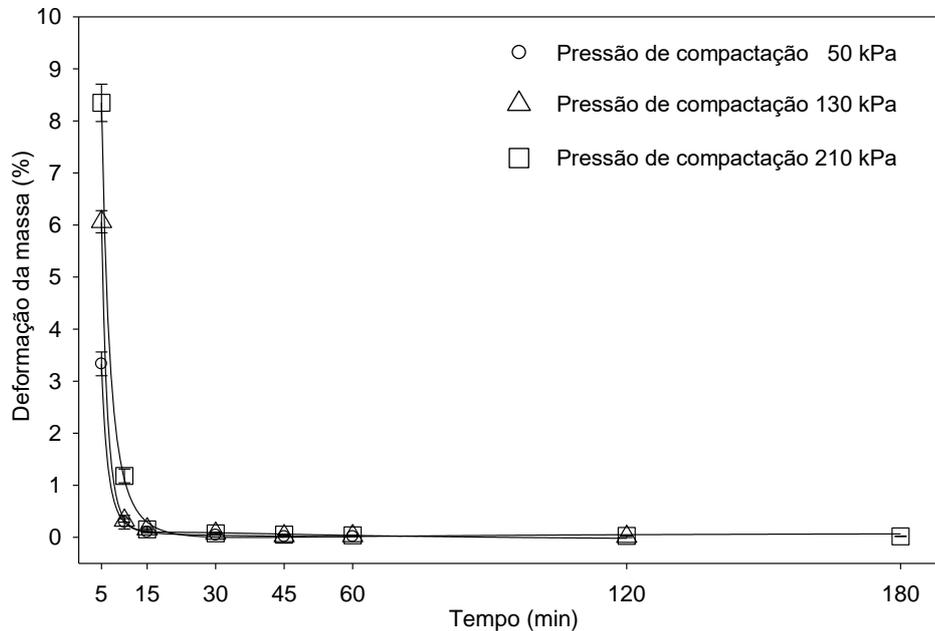


Figura 15 – Dinâmica de deformação da camada de grãos na compactação do arroz longo fino, em casca

Através do comportamento no percentual de deformação da massa de arroz longo, apresentado na Figura 16, na pressão de compactação de 50 kPa, verifica-se que aproximadamente 94% da deformação ocorreu já aos 5 minutos de compactação, e com uma taxa de deformação decrescente e de baixa amplitude, aos 30 minutos houve a ocorrência de 99% da deformação total, e demandou um tempo de estabilização de aproximadamente 60 minutos.

Com um tempo de estabilização maior, de aproximadamente 120 minutos, o percentual de deformação da massa, do arroz longo (Figura 16), na pressão de compactação de 130 kPa foi de aproximadamente 96%, e com um comportamento semelhante ao verificado para a pressão de compactação anterior, aos 30 minutos foi verificado a ocorrência de 99% da deformação total.

Para a pressão de compactação de 210 kPa, verifica-se que aproximadamente 94% da deformação ocorreu já aos 5 minutos de compactação, e com uma taxa de deformação decrescente e de baixa amplitude, aos 30 minutos houve a ocorrência de 98% da deformação total, e demandou um tempo de estabilização de aproximadamente 180 minutos.

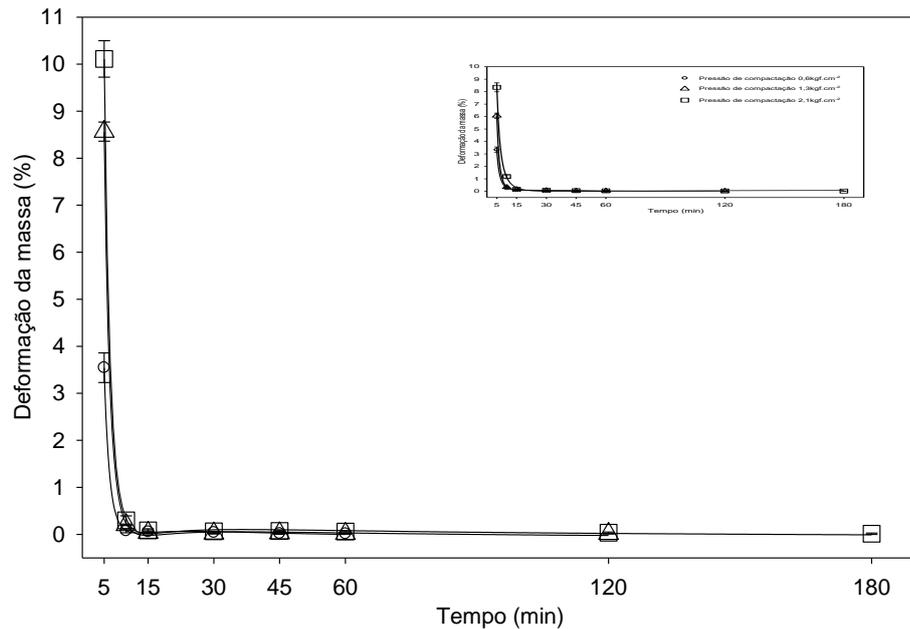


Figura 16 – Dinâmica de deformação da camada de grãos na compactação do arroz longo, em casca

Na Figura 17 é apresentado a dinâmica de deformação da massa de grãos de arroz longo curto, em casca, utilizando pressões de compactação de 50 kPa, 130 kPa e 210 kPa.

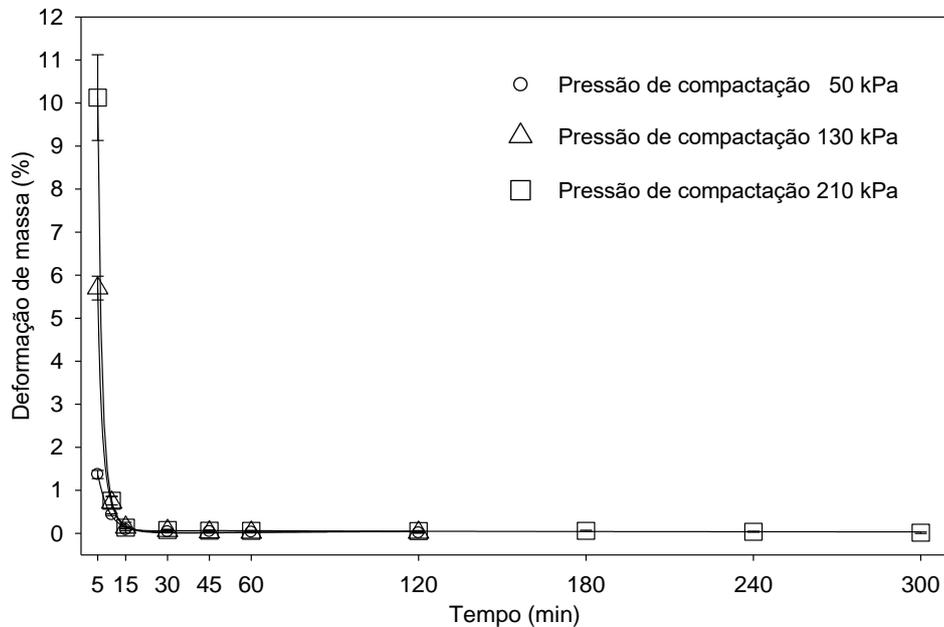


Figura 17 – Dinâmica de deformação da camada de grãos na compactação do arroz curto, em casca

Através do comportamento no percentual de deformação da massa de grãos apresentado na Figura 17, na pressão de compactação de 50kPa, verifica-se que

aproximadamente 68% da deformação ocorreu aos 5 minutos de compactação, aos 30 minutos houve a ocorrência de 95% e aos 60 minutos a ocorrência de 99% da deformação total, e demandou um tempo de estabilização de aproximadamente 120 minutos.

Com um tempo de estabilização semelhante, de aproximadamente 120 minutos, o percentual de deformação da massa na pressão de compactação de 130 kPa foi de aproximadamente 85% aos 5 minutos de compactação, e aos 30 minutos houve a ocorrência de 98% da deformação total.

Para a pressão de compactação de 210 kPa verifica-se que aproximadamente 88% da deformação ocorreu aos 5 minutos de compactação, aos 30 minutos houve a ocorrência de 97% da deformação da massa, e aos 60 minutos a deformação atingiu 98% da deformação total, e demandou um tempo de estabilização de aproximadamente 300 minutos.

Pelo comportamento da dinâmica de deformação da massa grãos, na compactação do arroz, em casca, das classes longo fino, longo e curto, apresentados nas Figuras 15, 16 e 17 é possível verificar que, em média, a maior deformação da massa ocorre nos primeiros momentos da compactação dos grãos, com mais de 92% da deformação total já nos primeiros 10 minutos.

Os maiores tempos de estabilização na deformação da massa de grãos foram predominantemente para as maiores pressões de compactação. Embora se verifiquem, no período transitório de estabilização da massa, após os primeiros 30 minutos, reduzidos percentuais de deformação, o comportamento dos valores descreve uma trajetória assintótica.

A Tabela 12 apresenta os valores dos parâmetros da função polinomial invertida, de terceira ordem, utilizada para descrever o comportamento da dinâmica de deformação da massa, até a estabilização da compactação da massa de grãos de arroz, em casca, das classes longo fino, longo e curto.

Tabela 12 – Constante e parâmetros obtidos pelo polinômio utilizado para descrever o comportamento dos percentuais de deformação da massa em função da pressão e do tempo de compactação da massa de grãos

Classe do arroz	Pressão de compactação (kPa)	Constante (y_i)	Parâmetros	
Longo fino	50	-0,1551	a	-4,9510
			b	-271,5482
			c	-751,8599
	130	-0,3081	a	-12,0020
			b	-733,1645
			c	-1692,3666
	210	-0,1034	a	-21,8131
			b	-105,4245
			c	-685,5437
Longo	50	-0,4705	a	-12,9327
			b	-716,8835
			c	-1334,1657
	130	-0,0612	a	-8,5022
			b	-28,4990
			c	-633,2954
	210	-0,2562	a	-15,9662
			b	-1234,3917
			c	-2932,5983
Curto	50	-0,0926	a	-18,9591
			b	-126,0504
			c	-937,8705
	130	-0,3589	a	-14,3926
			b	-1089,3108
			c	-2541,2149
	210	-0,0201	a	-4,9749
			b	-543,1746
			c	-2044,2693

4.2.2. Análise das alterações de massa específica aparente pelos modelos preditivos de compactação de massa

As Figuras 18, 19 e 20 apresentam o comportamento dos modelos de Thompson *et al.*, (1987), Thompson *et al.*, (1987^a), Steffe (1992^a), Johanson e Cox (1989), Overhults (1973^a), e Cheng *et al.*, (2017), no ajustamento de coeficientes para a variação da massa específica aparente do arroz, em casca, longo fino, longo e curto, respectivamente, em função da pressão de compactação da massa de grãos e da massa específica aparente inicial (^a modelos modificados por Turner *et al.*, (2016)).

Os parâmetros dos modelos ajustados aos dados experimentais de massa específica aparente na compactação da massa de grãos para o arroz, em casca, das classes longo fino, longo e curto, para diferentes pressões de compactação, estão

apresentados na Tabela 13, juntamente com seus respectivos valores de erro médio relativo (EMR%) e coeficiente de determinação (R^2).

Pelo comportamento de projeção dos modelos (Figuras 18, 19 e 20), em relação aos pontos experimentais, aliado aos critérios de desempenho dos modelos apresentados na Tabela 13, verifica-se que todos os modelos tiveram bom desempenho, com altos valores de coeficiente de determinação (R^2) e baixos valores de erro médio relativo (EMR%).

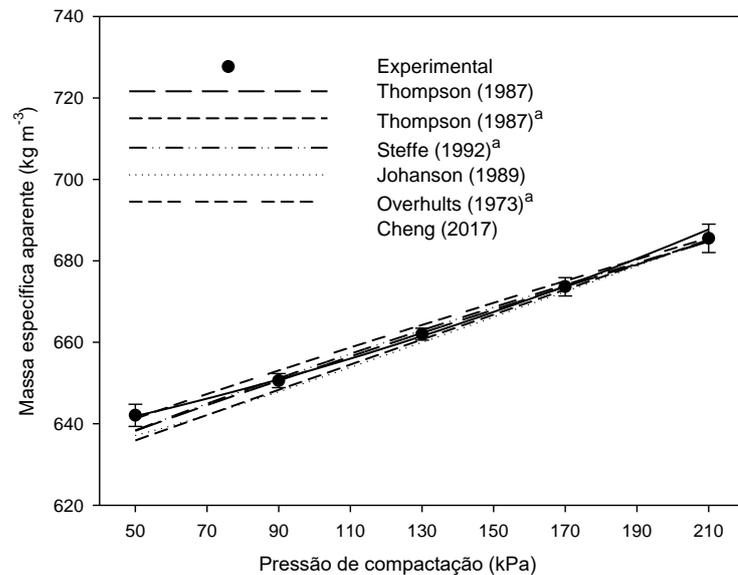


Figura 18 – Projeção dos modelos de Thompson, Thompson^a (modificado), Steffe^a, Johanson, Overhults^a, e Cheng, para a massa específica aparente do arroz longo fino, em casca, em função da pressão de compactação

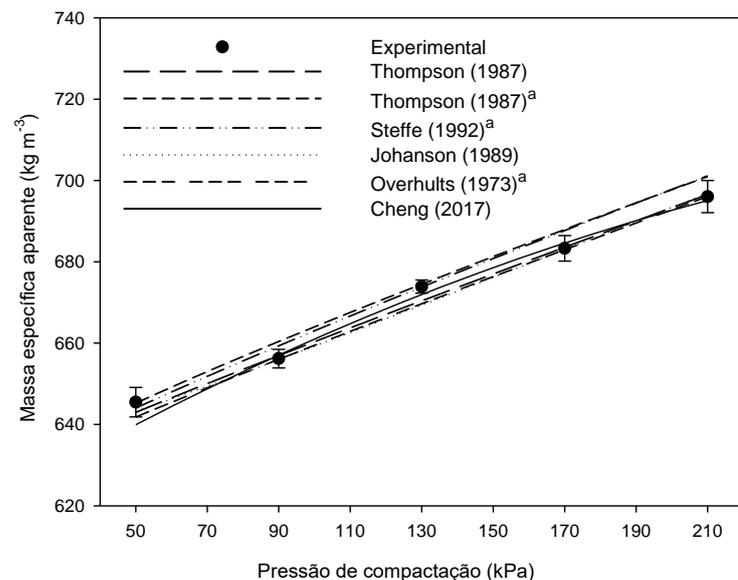


Figura 19 – Projeção dos modelos de Thompson, Thompson^a (modificado), Steffe^a, Johanson, Overhults^a, e Cheng, para a massa específica aparente do arroz longo, em casca, em função da pressão de compactação

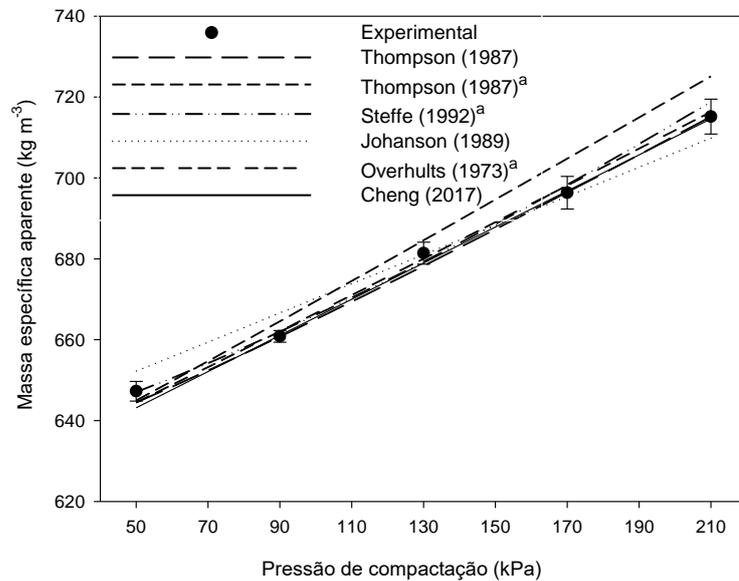


Figura 20 – Projeção dos modelos de Thompson, Thompson^a (modificado), Steffe^a, Johanson, Overhults^a, e Cheng, para a massa específica aparente do arroz curto, em casca, em função da pressão de compactação

Embora todos os modelos tenham apresentado baixos valores de erro médio relativo, predominantemente o modelo de Cheng apresentou os menores valores de erro médio relativo, seguido do modelo de Johanson, sendo o modelo mais indicado para a estimativa da massa específica aparente do arroz, em casca, na compactação de massa.

Tabela 13 – Parâmetros obtidos pelos modelos utilizados para analisar o comportamento da massa específica aparente das diferentes classes de arroz, em casca, em função da pressão de compactação

Modelo	Parâmetros	Classes de arroz		
		Longo fino	Longo	Curto
Thompson	a	0,096462	0,0766	0,4073
	b	1,2517	1,0354	-2,4818
	c	1,0145	1,6374	1,1575
	R ²	0,991	0,989	0,993
	EMR (%)	2,52	3,62	1,67
Thompson ^a	a	0,2605	-4,6457	-7,7141
	b	1,3257	0,5976	-8,9170
	c	0,3051	36,6640	63,9308
	d	0,2090	0,9024	0,1391
	R ²	0,985	0,987	0,994
	EMR (%)	3,37	3,42	1,51
Steffe ^a	a	0,8022	1,1566	1,1382
	b	0,8225	0,8754	1,3138
	c	0,1979	-3,4818	-21,0895
	R ²	0,989	0,990	0,991
	EMR (%)	2,85	3,64	2,73

Johanson e Cox	a	0,5616	43,2758	13,3749
	b	-1,5427	-0,6457	-1,5961
	c	2,3764	2,7399	2,7965
	R ²	0,994	0,988	0,950
	EMR (%)	1,88	3,32	1,38
Overhults ^a	a	-0,0051	-0,0007	0,0125
	b	0,3319	0,7800	0,1292
	c	1,7266	1,5613	3,6129
	R ²	0,993	0,987	0,994
	EMR (%)	2,31	3,80	1,44
Cheng	a	0,0005	-0,0006	-0,000006
	b	0,1533	0,5261	0,4482
	c	15,1065	-5,9584	-13,4380
	R ²	0,999	0,989	0,994
	EMR (%)	0,50	3,27	1,29

^aModelo ajustado por Turner *et al.*, (2016)

Pela ausência da variável de grau de umidade no modelo de Cheng, e considerando que este é um fator de interferência mais proeminente em pressões abaixo ou muito próximas a 25 kPa, neste caso, sugere-se que o modelo de Johanson seja o mais adequado.

4.3. Influência da compactação de massa sobre o fluxo de ar de aeração

A Figura 21 apresenta os intervalos de fluxo de ar programado e as variações médias do fluxo de ar praticado para a obtenção da perda de carga na aeração do arroz em casca, das classes longo fino, longo e curto, com e sem compactação da massa de grãos.

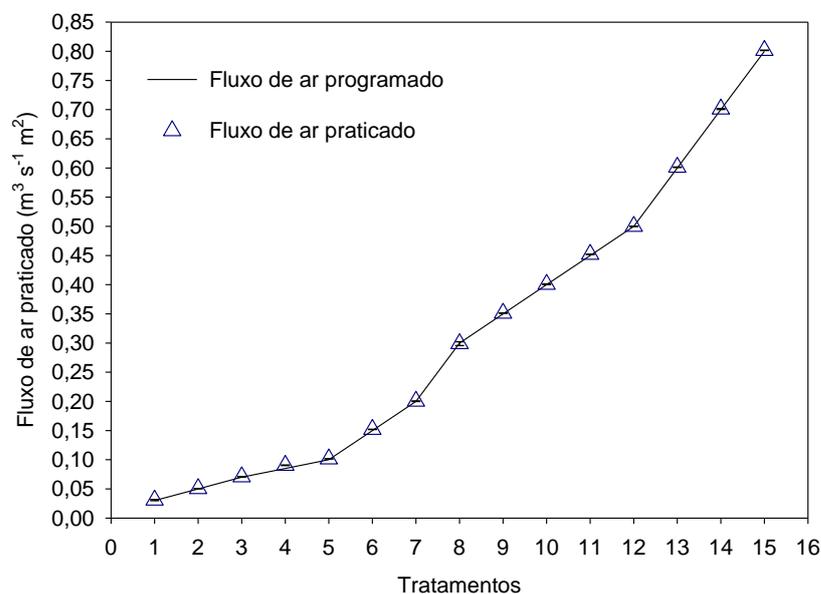


Figura 21 – Variação no fluxo de ar praticado em relação aos valores programados

Verifica-se pelo comportamento dos fluxos de ar, programado e praticado, que o sistema de aeração e de controle de fluxo proporcionaram boa estabilidade para os fluxos de ar pretendidos. Com isto, é possível afirmar que as diferenças encontradas na investigação da perda de carga, em função das diferentes massas específicas aparentes e pressões de compactação da massa de grãos, encontrados para o arroz das classes longo fino, longo e curto, com e sem compactação da massa de grãos, são predominantemente devidas aos tratamentos aplicados.

4.3.1. Perda de carga na aeração do arroz em casca sem compactação da massa de grãos

A Figura 22 apresenta a variação da perda de carga em função das diferentes classes de arroz, longo fino, longo e curto, e do fluxo de ar, na aeração da massa de grãos sem compactação de massa.

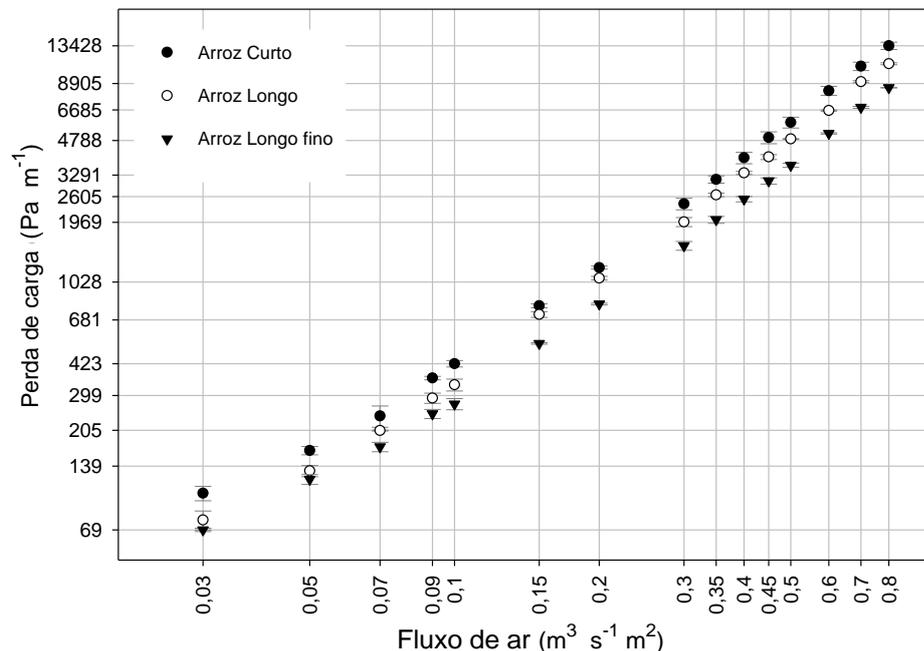


Figura 22 – Influência das diferenças entre as classes de arroz, em casca, e do fluxo de ar na perda de carga da massa de grãos, sem compactação

Pelo comportamento dos valores médios de perda de carga, em função da variação do fluxo de ar e das diferentes classes de arroz em casca, foi possível verificar que o arroz da classe longo fino apresentou uma perda de carga de $69,37 \text{ Pa m}^{-1}$, para o menor fluxo de ar ($0,03 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{m}^2$) e de $8.512,33 \text{ Pa m}^{-1}$ para o maior fluxo de ar ($0,8$

$\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^2$). Para o arroz da classe longo foram verificados valores médios de perda de carga de $77,21 \text{ Pa m}^{-1}$ e $11.049,70 \text{ Pa m}^{-1}$, respectivamente para o menor e o maior fluxo de ar.

Os maiores valores médios de perda de carga, de $81,48 \text{ Pa m}^{-1}$ e $13.427,80 \text{ Pa m}^{-1}$, respectivamente para o menor e o maior fluxo de ar, foram percebidos para o arroz da classe curto.

HUSAIN e OJHA (1969), verificando a perda de pressão ocasionada por diferentes cultivares de arroz em casca, utilizando fluxos de ar de aproximadamente $0,03$, $0,05$, $0,07$, $0,09$ e $0,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{m}^2$ apresentou respectivamente valores de 67 Pa.m^{-1} , 121 Pa.m^{-1} , 214 Pa m^{-1} , 297 Pa m^{-1} e 343 Pa m^{-1} , para uma variedade de arroz com dimensões, esfericidade e proporção de área muito próximas ao arroz das classes longo fino e longo, utilizado neste estudo. A escala de valores de perda de carga, relatado pelos referidos autores, são semelhantes aos obtidos para o arroz das classes longo fino e longo, para os intervalos de fluxo de ar citados.

Com uma massa específica aparente de $621,32 \text{ kg m}^{-3}$, aproximadamente $0,57\%$ maior que a massa específica aparente verificada para o arroz longo fino ($617,80 \text{ kg m}^{-3}$), a perda de carga no arroz longo foi, em média, de $20,46 \pm 2,47\%$ e $31,37 \pm 2,52\%$ maior que o arroz longo fino, respectivamente, para uma variação no fluxo de ar entre $0,03$ e $0,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{m}^2$ e entre $0,15$ a $0,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{m}^2$.

Apresentando uma massa específica aparente de $634,21 \text{ kg m}^{-3}$, aproximadamente $2,65\%$ e $2,07\%$ maior que a massa específica aparente verificada, respectivamente, para o arroz longo fino e longo, a perda de carga no arroz curto foi, em média, $45,54 \pm 3,93\%$ e $57,11 \pm 3,78\%$ maior em relação ao arroz longo fino e de $25,22 \pm 1,96\%$ e $19,56 \pm 2,20\%$ maior em relação ao arroz longo, valores percentuais para uma variação no fluxo de ar entre $0,03$ e $0,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{m}^2$ e entre $0,15$ a $0,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{m}^2$, respectivamente.

Pela baixa proporção no comportamento entre os valores percentuais de ganho de perda de carga e a crescente massa específica aparente, decorrente das diferentes classes de arroz, é possível que as diferenças percebidas estejam fortemente associadas com um aumento de $7,14\%$ na esfericidade, 20% na proporção de área dos grãos e uma redução de $1,92\%$ na porosidade, do arroz longo em relação ao arroz longo fino, e de um aumento de $52,38\%$ e $42,22\%$ na esfericidade, de $106,66\%$ e $72,22\%$ na proporção de área dos grãos e uma redução de $14,89\%$ e $12,80\%$ na porosidade, do arroz curto em relação ao arroz longo fino e longo, respectivamente.

Os resultados obtidos mostram que, entre as classes de arroz analisadas, a perda de carga foi maior para o arroz curto, seguido do arroz longo e longo fino, este comportamento está de acordo com o relatado por Yang e Willian (1990) que indicam que a resistência a passagem do fluxo de ar, na massa de grãos, aumenta com o aumento da massa específica aparente.

4.3.2. Análise da perda de carga na aeração do arroz em casca sem compactação da massa de grãos

As Figuras 23, 24 e 25 apresentam o comportamento dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, no ajustamento de coeficientes para a variação da perda de carga em função das diferentes classes de arroz, longo fino, longo e curto, e do fluxo de ar, na aeração da massa de grãos sem compactação.

Pelo comportamento da projeção dos modelos utilizados para descrever a perda de carga, em função da variação do fluxo de ar para as classes de arroz em casca, longo fino, logo, e curto, é possível verificar que o modelo de Darcy não foi capaz de descrever com razoabilidade o comportamento dos pontos experimentais.

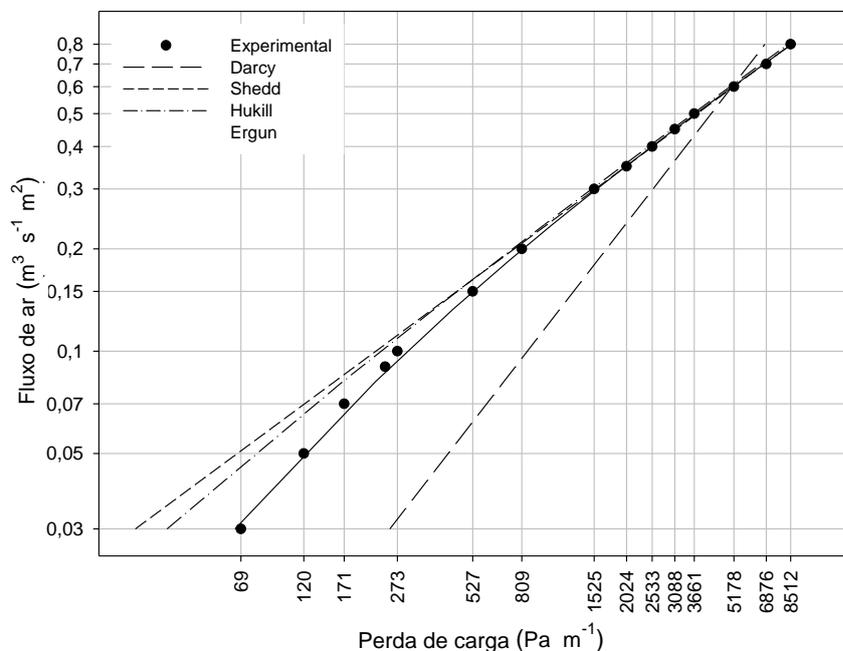


Figura 23 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, sobre os pontos experimentais de perda de carga na aeração do arroz longo fino, em casca, sem compactação de massa

O modelo de Shedd, embora inicialmente presente, para uma variação de fluxo de ar entre 0,03 a 0,2 m³ s⁻¹ m², um comportamento de projeção distante dos pontos

experimentais, para todas as classes de arroz analisadas, apresenta também uma proximidade muito maior em relação aos pontos experimentais quando comparado com o comportamento da projeção do modelo de Darcy. Este comportamento também é verificado para as classes de arroz longo e curto (Figuras 24 e 25).

Além disso, observa-se que houve melhor acurácia na projeção do modelo de Shedd sobre todos os demais pontos experimentais, para um intervalo fluxo de ar entre 0,2 a 0,8 $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^2$, para o arroz das classes longo fino e longo (Figuras 23 e 24), o mesmo comportamento foi percebido para o arroz da classe curto, entretanto para um intervalo de fluxo de ar entre 0,15 a 0,8 $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^2$ (Figura 25).

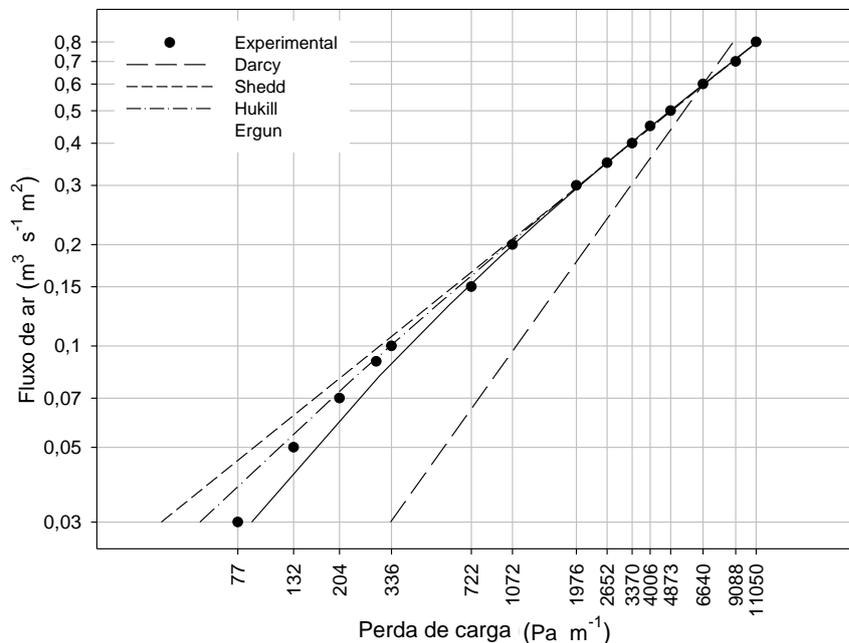


Figura 24 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill e Ives, e Ergun sobre os pontos experimentais de perda de carga na aeração do arroz longo, em casca, sem compactação de massa

Com um comportamento similar ao modelo de Shedd, o modelo de Hukill & Ives apresentou inicialmente uma projeção afastada dos pontos experimentais, para todas as classes de arroz, isto ocorreu para o arroz das classes longo fino e curto (Figuras 23 e 25) no intervalo de fluxo de ar entre 0,03 a 0,2 $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^2$, e para o arroz longo no intervalo de fluxo de ar entre 0,03 a 0,07 $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^2$ (Figura 24).

No intervalo de fluxo de ar entre 0,2 e 0,8 $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^2$ os modelos de Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, demonstraram boa acurácia de projeção sobre todos os demais pontos experimentais para todas as classes do arroz em casca.

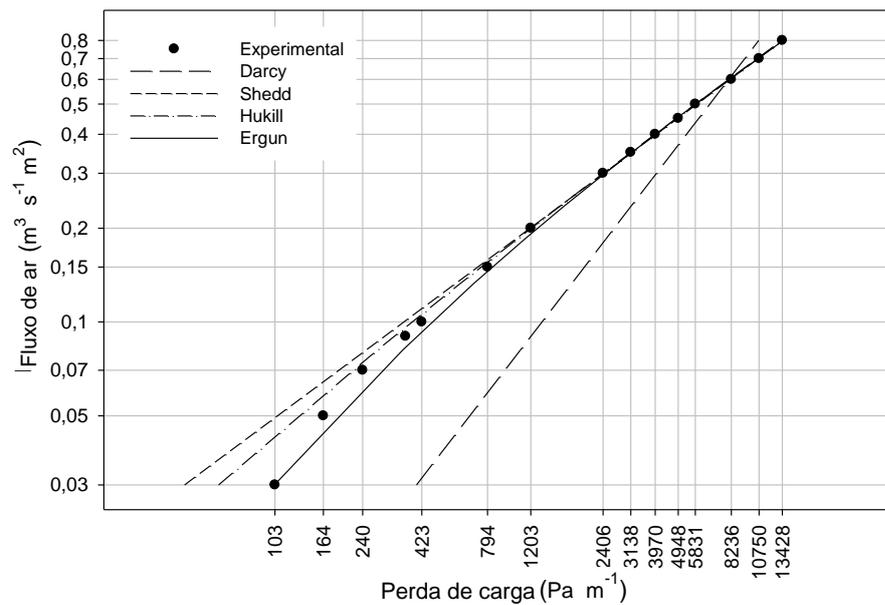


Figura 25 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, sobre os pontos experimentais de perda de carga na aeração do arroz curto, em casca, sem compactação de massa

Com uma projeção mais assertiva, e sequencial sobre dois pontos experimentais, já nos fluxos de ar iniciais, e um estreito afastamento para uma variação de fluxo de ar entre 0,07 e 0,1 m³ s⁻¹ m², o modelo de Ergun apresentou melhor acurácia sobre todos os demais pontos experimentais para o arroz da classe longo fino (Figura 23).

Apesar de se destacar, no comportamento de projeção para o arroz, em casca, da classe longo fino (Figura 23), o modelo de Ergun apresentou inicialmente uma projeção afastada dos pontos experimentais, para o arroz, em casca, das classes longo e curto, no intervalo de fluxo de ar entre 0,03 a 0,15 m³ s⁻¹ m² (Figuras 24 e 25). Para variações de fluxo de ar entre 0,15 e 0,8 m³ s⁻¹ m², o modelo de Ergun apresentou boa acurácia sobre todos os demais pontos experimentais, para o arroz das classes longo e curto (Figuras 24 e 25).

Os parâmetros dos modelos ajustados aos dados experimentais de perda de carga (Pa m⁻¹) para diferentes classes de arroz em casca, sem compactação da massa de grãos, em função do fluxo de ar (m³ s⁻¹ m²) estão apresentados na Tabela 14, juntamente com seus respectivos valores de erro médio relativo (EMR) e coeficiente de determinação (R²).

Tabela 14 – Parâmetros obtidos dos modelos utilizados para analisar a perda de carga na aeração do arroz longo fino, longo e curto, em casca, sem compactação da massa

Modelo	Parâmetros	Classes de arroz		
		Longo Fino	Longo	Curto
Darcy	a	8.502,5 ± 66,3	11.106,50 ± 49,8	13.404,00 ± 622,97
	R ²	0,899	0,903	0,902
	EMR (%)	111,5	124,8	123,1
Shedd	a	12.626,7 ± 178,7	16.415,42 ± 83,3	19.906,31 ± 768,83
	b	1,74 ± 0,04	1,74 ± 0,01	1,75 ± 0,02
	R ²	0,999	0,999	0,999
	EMR (%)	13,3	10,9	11,2
Hukill	a	58.092,5 ± 8.573,6	72.305,12 ± 2293,9	91.346,18 ± 4553,3
	b	107,25±58,7	78,60 ± 11,1	97,49 ± 30,20
	R ²	0,999	0,999	0,999
	EMR (%)	8,9	7,4	7,5
Ergun	a	1.859,8 ± 314,2	2.506,32 ± 104,0	2.896,05 ± 326,6
	b	11.130,9 ± 432,7	14.410,98 ± 91,15	17.607,76 ± 587,27
	R ²	0,999	0,999	0,999
	EMR (%)	4,2	6,1	5,9

Os resultados do ajuste dos dados experimentais de perda de carga aos modelos testados mostram que três dos quatros modelos apresentaram bom desempenho, apesar de o modelo de Darcy apresentar bons valores de coeficiente de determinação o erro médio relativo obtido não é aceitável.

Os modelos de Hukill & Ives, e de Ergun, apresentaram valores de erro médio relativo menores que 10%, e embora o modelo de Shedd tenha apresentado valores de coeficiente de determinação próximos aos verificados Hukill & Ives e de Ergun, o erro médio relativo foi superior a 10%.

O modelo que melhor prediz a perda de carga no arroz em casca, das classes longo fino, longo e curto, sem compactação da massa de grãos, é o modelo de Ergun, seguido do modelo de Hukill & Ives.

4.4. Perda de carga na aeração do arroz em casca com compactação da massa de grãos

4.4.1. Perda de carga na aeração do arroz da classe longo fino

A Figura 26 apresenta a variação da perda de carga no arroz longo fino, em função da pressão de compactação da massa e do fluxo de ar, na aeração da massa de grãos.

Os resultados obtidos mostram que, a perda de carga aumentou em função do aumento da pressão de compactação e do fluxo de ar. O comportamento da perda de carga ocasionada pelo aumento da massa específica aparente, resultante da

compactação da massa de grãos, está de acordo com o relatado por Yang e Willian (1990) que indicam que a resistência a passagem do fluxo de ar, na massa de grãos, aumenta com o aumento da massa específica aparente.

Inicialmente, com a massa de grãos não compactada, o arroz longo fino apresentou uma massa específica aparente de $617,80 \pm 0,98 \text{ kg m}^{-3}$ e após a atuação das pressões de compactação as massas específicas aparentes aumentaram para $642,07 \pm 3,34 \text{ kg m}^{-3}$ na pressão de compactação de 50 kPa, $661,98 \pm 2,56 \text{ kg m}^{-3}$ na pressão de compactação de 130 kPa, e $685,52 \pm 4,27 \text{ kg m}^{-3}$ na pressão de compactação de 210 kPa. Estas elevações na massa específica aparente do arroz longo fino, com compactação de massa, representam um acréscimo de 3,92%, 7,15% e 10,96%, respectivamente nas pressões de compactação de 50 kPa, 130 kPa e 210 kPa.

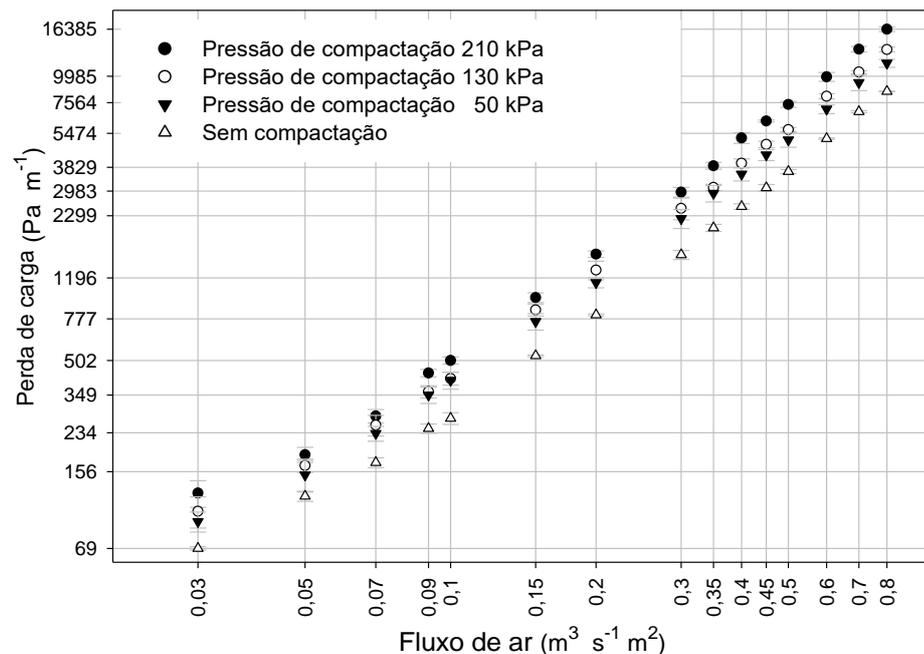


Figura 26 – Influência da pressão de compactação da massa de grãos e do fluxo de ar na perda de carga na aeração do arroz longo fino, em casca

Cheng *et al.*, (2015) estudando a influência da pressão de compactação em função da massa específica aparente, utilizando grãos de milho, aplicou pressões de compressão de 0 a 300 kPa, e verificou incrementos percentuais de 4,64% a 11,70%, entre a massas específicas aparente inicial e finais, no teste de compactação da massa de grãos. Este comportamento, e escalada, de valores percentuais são compatíveis com os resultados obtidos para o arroz longo fino, em casca.

Através do comportamento da perda de carga do arroz, longo fino, sem compactação de massa, em relação ao comportamento da perda de carga da massa do arroz, longo fino, com compactação de massa (Figura 26), é possível perceber que a pressão de compactação elevou a perda de carga, mas não alterou a trajetória dos pontos experimentais.

Pelos valores médios de pressões estática para o arroz longo fino, em função da pressão de compactação da massa de grãos, é possível verificar que a pressão de compactação de 50 kPa apresentou os menores valores de pressões estática, de 93,03 Pa.m⁻¹ para o menor fluxo de ar (0,03 m³ s⁻¹ m²) e de 11.459,55 Pa m⁻¹ para o maior fluxo de ar (0,8 m³ s⁻¹ m²).

Para a pressão de compactação de 130 kPa, foram verificados valores médios de pressões estática de 102,68 Pa m⁻¹ para o menor fluxo de ar, e de 13.241,31 Pa m⁻¹ para o maior fluxo de ar.

As maiores pressões estática foram verificadas para a pressão de compactação de 210 kPa, que apresentou valores de 124,25 Pa m⁻¹ para o menor fluxo de ar e de 16.384,43 Pa m⁻¹ para o maior fluxo de ar.

Os maiores valores de perda de carga percebidos para o arroz da classe longo fino, com compactação da massa de grãos, em relação ao arroz longo fino sem a compactação da massa de grãos, podem ser atribuídos ao aumento da massa específica aparente, decorrente da pressão de compactação, conforme sugerido por Cheng *et al.*, (2015).

A massa específica aparente de 642,07 ± 3,34 kg m⁻³, 661,98 ± 2,56 kg m⁻³ e 685,52 ± 4,27 kg m⁻³, resultantes de suas respectivas pressões de compactação, produziram em relação ao arroz longo fino, sem compactação da massa de grãos, em média, um percentual de aumento de perda de carga de 34,37 ± 2,85%, 48,00 ± 3,14% e 73,97 ± 3,74%, para um fluxo de ar de 0,03 a 0,1 m³ s⁻¹ m², e 42,04 ± 3,37%, 57,29 ± 3,68% e 94,18 ± 4,86%, para um fluxo de ar de 0,15 a 0,8 m³ s⁻¹ m².

Os percentuais de incrementos de perda de carga entre as pressões de compactação de 50 e 130 kPa, 130 e 210 kPa e 50 e 210 kPa, foram de respectivamente 6,35 ± 0,61%, 14,72 ± 1,91%, e 24,41 ± 2,43 para um fluxo de ar de 0,03 a 0,1 m³ s⁻¹ m², e de 12,41 ± 1,01%, 25,60 ± 3,10% e 40,46 ± 4,06% para um fluxo de ar de 0,15 a 0,8 m³ s⁻¹ m².

4.4.1.1. Análise da perda de carga na aeração do arroz longo fino

As Figuras 27, 28 e 29 apresentam o comportamento dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, no ajustamento de coeficientes para a variação da perda de carga no arroz longo fino, em função da pressão de compactação de massa e do fluxo de ar, na aeração da massa de grãos.

Através da análise de comportamento da projeção dos modelos utilizados para representar a perda de carga no arroz em casca, longo fino, em função da pressão de compactação da massa de grãos e do fluxo de ar, é possível verificar que o modelo de Darcy não apresentou boa acurácia sobre os pontos experimentais para todas as pressões de compactação da massa de grãos.

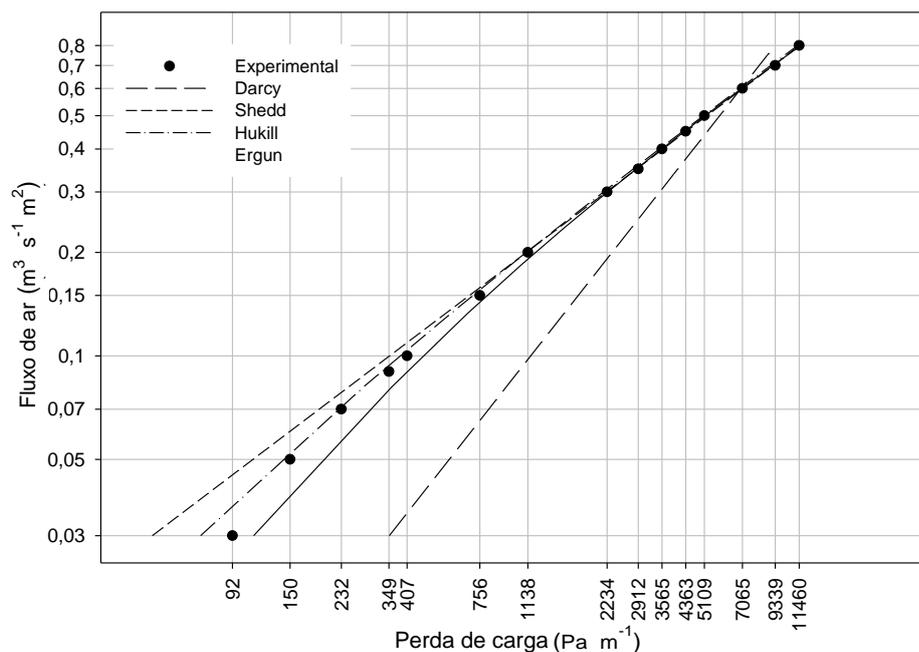


Figura 27 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, para a perda de carga na aeração do arroz longo fino, em casca, com pressão de 50 kPa na compactação da massa de grãos

O modelo de Shedd, embora inicialmente apresente, para uma variação de fluxo de ar entre 0,03 a 0,2 m³ s⁻¹ m², um comportamento de projeção distante dos pontos experimentais, para todas as pressões de compactação da massa de grãos, apresenta uma proximidade muito maior em relação aos pontos experimentais quando comparado com o comportamento do modelo de Darcy.

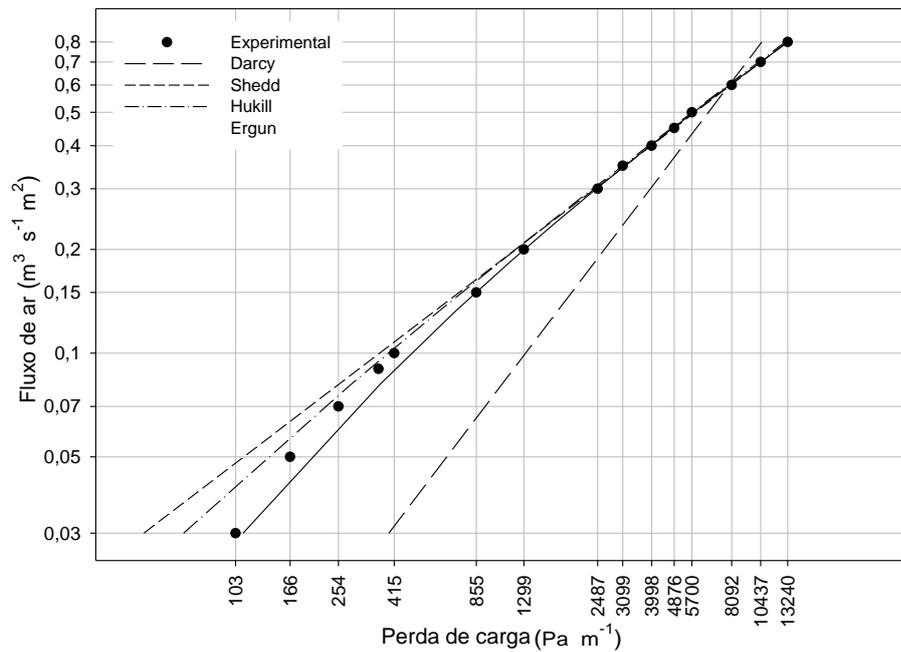


Figura 28 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, para a perda de carga na aerção do arroz longo fino, em casca, com pressão de 130 kPa na compactação da massa de grãos

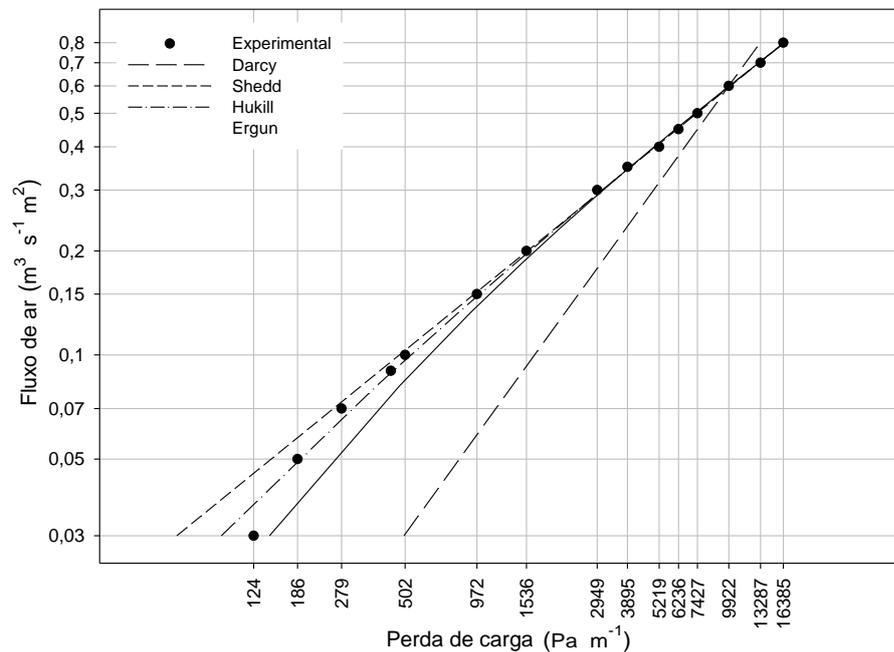


Figura 29 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, para a perda de carga na aerção do arroz longo fino, em casca, com pressão de 210 kPa na compactação da massa de grãos

Com um comportamento similar ao modelo de Shedd, o modelo de Ergun apresentou inicialmente uma projeção distante dos pontos experimentais, para todas as pressões de compactação da massa de grãos e para um intervalo de fluxo de ar entre 0,03 a 0,2 m³ s⁻¹ m².

Apesar de se destacar, no comportamento de projeção para a pressão de compactação da massa de grãos de 50 kPa (Figura 27), devido a ocorrência do distanciamento de apenas um ponto experimental, para o fluxo de ar de $0,03 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$, a projeção do modelo de Hukill & Ives apresentou boa acurácia para todos os demais pontos experimentais. Para as pressões de compactação da massa de grãos de 130 kPa e 210 kPa (Figuras 28 e 29), respectivamente, verificam-se afastamentos de quatro pontos experimentais para o intervalo de fluxo de ar $0,03$ a $0,15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$, e de dois pontos experimentais para os fluxos de ar de $0,03$ e $0,07 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$, na projeção do modelo de Hukill & Ives. Para um intervalo de fluxo de ar entre $0,2$ a $0,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$, verifica-se que os modelos de Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, apresentaram boa acurácia sobre os pontos experimentais.

Os parâmetros dos modelos ajustados aos dados observados de perda de carga (Pa m^{-1}) para o arroz em casca, longo fino, para diferentes pressões de compactação da massa de grãos em função do fluxo de ar ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$) são apresentados na Tabela 15, juntamente com seus respectivos valores de erro médio relativo (EMR) e coeficiente de determinação (R^2).

Tabela 15 – Parâmetros obtidos dos modelos utilizados para analisar a perda de carga na aeração do arroz longo fino, em casca, com compactação da massa

Modelo	Parâmetros	Pressões de compactação		
		50 kPa	130 kPa	210 kPa
Darcy	a	$11.654,7 \pm 677,7$	$13.194,7 \pm 360,9$	$16.553,2 \pm 460,1$
	R^2	0,903	0,906	0,908
	EMR (%)	109,7	116,7	127,7
Shedd	a	$16.726,9 \pm 841,7$	$19.374,0 \pm 286,6$	$24.074,3 \pm 578,9$
	b	$1,67 \pm 0,04$	$1,72 \pm 0,03$	$1,70 \pm 0,01$
	R^2	0,999	0,999	0,999
	EMR (%)	9,98	11,4	7,6
Hukill	a	$62.021,1 \pm 7.398,4$	$81.932,2 \pm 7.695,1$	$96.742,6 \pm 2531,7$
	b	$40,55 \pm 16,7$	$70,27 \pm 33,7$	$52,43 \pm 7,59$
	R^2	0,999	0,999	0,999
	EMR (%)	4,0	5,9	12,62
Ergun	a	$3.250,9 \pm 572,0$	$3.149,0 \pm 442,6$	$4.166,0 \pm 258,1$
	b	$14.081,8 \pm 804,9$	$16.833,1 \pm 214,4$	$20.756,7 \pm 417,7$
	R^2	0,999	0,999	0,998
	EMR (%)	4,2	6,5	5,3

Os resultados do ajuste dos dados experimentais de perda de carga aos modelos testados mostram que três dos quatro os modelos apresentaram elevados valores do coeficiente de determinação seguido de baixos valores de erro médio relativo. Embora o

modelo de Darcy tenha gerado valores de coeficiente de determinação razoáveis os valores de erro médio relativo encontrados não foram aceitáveis.

Verifica-se pelos valores obtidos de coeficiente de determinação e pelos de baixos valores de erro médio relativo que ambos os modelos de Ergun e Hukill & Ives apresentaram com desempenho. Pela proximidade no comportamento de desempenho Ergun pode ser preferido por apresentar valores preditivos de perda de carga sempre imediatamente superiores aos valores experimentais. O modelo de Shedd, embora tenha apresentado elevados coeficientes de determinação, não apresentou predominância de baixos valores de erro médio relativo compatíveis com os modelos de Ergun e Hukill & Ives.

4.4.2. Perda de carga na aeração do arroz longo

A Figura 30 apresenta a variação da perda de carga na aeração do arroz longo, em função da pressão de compactação da massa e do fluxo de ar, na aeração da massa de grãos. Pelo comportamento dos valores médios de pressões estática para o arroz longo, em função da pressão de compactação da massa de grãos, é possível verificar que a pressão de compactação de 50 kPa apresentou os menores valores de pressões estática, de 113,27 Pa m⁻¹ para o menor fluxo de ar (0,03 m³ s⁻¹ m²) e de 14.480,13 Pa m⁻¹ para o maior fluxo de ar (0,8 m³ s⁻¹ m²).

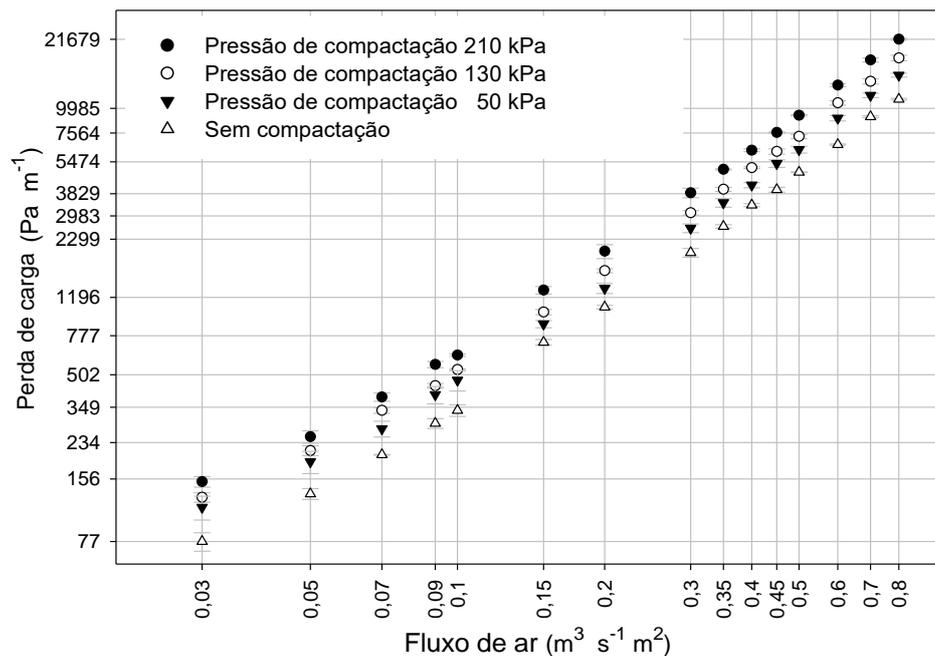


Figura 30 – Influência da pressão de compactação da massa de grãos e do fluxo de ar na queda de pressão na aeração do arroz longo, em casca

Para a pressão de compactação de 130 kPa, foram verificados valores médios de pressões estática de 126,62 Pa m⁻¹ para o menor fluxo de ar e de 17.558,29 Pa m⁻¹ para o maior fluxo de ar. As maiores pressões estática foram verificadas para a pressão de compactação de 210 kPa, que apresentou valores de 151,04 Pa m⁻¹ para o menor fluxo de ar e de 21.679,08 Pa m⁻¹ para o maior fluxo de ar.

Inicialmente, com a massa de grãos não compactada, o arroz longo apresentou uma massa específica aparente de 621,32 ± 0,93 kg m⁻³ e após atuação das pressões de compactação sobre a massa de grãos a massa específica aparente do arroz longo aumentou para 645,49 ± 4,43 kg m⁻³ na pressão de compactação de 50 kPa, 673,89 ± 2,29 kg m⁻³ na pressão de compactação de 130 kPa, e de 696,01 ± 4,85 kg m⁻³ na pressão de compactação de 210 kPa.

Estas elevações na massa específica aparente, do arroz longo, com compactação de massa, representam um acréscimo de 3,89%, 9,34% e 12,02%, respectivamente para as pressões de compactação de 50 kPa, 130 kPa e 210 kPa. Este comportamento de valores percentuais percebidos para o arroz longo é compatível com o comportamento dos valores relatados por Cheng *et al.*, (2015).

A massa específica aparente de 645,49 ± 4,43 kg m⁻³, 673,89 ± 2,29 kg m⁻³ e 696,01 ± 4,85 kg m⁻³, resultantes de suas respectivas pressões de compactação, produziram em relação ao arroz longo, sem compactação da massa de grãos, em média, um aumento percentual de perda de carga de 40,58 ± 2,68%, 61,55 ± 3,12% e 91,53 ± 3,86%, para um fluxo de ar de 0,03 a 0,1 m³ s⁻¹ m², e 30,77 ± 3,51%, 52,22 ± 2,48% e 89,94 ± 2,57%, para um fluxo de ar de 0,15 a 0,8 m³ s⁻¹ m².

Os percentuais de incremento de perda de carga entre as pressões de compactação de 50 e 130 kPa, 130 e 210 kPa e 50 e 210 kPa, foram de respectivamente de 12,59 ± 1,82%, 17,90 ± 1,28%, e 35,35 ± 3,87 para um fluxo de ar de 0,03 a 0,1 m³ s⁻¹ m², e de 18,01 ± 2,03%, 24,76 ± 2,13% e 47,29 ± 2,77% para um fluxo de ar de 0,15 a 0,8 m³ s⁻¹ m².

Através do comportamento da perda de carga do arroz longo, sem compactação de massa, em relação ao comportamento da perda de carga da massa do arroz longo, com compactação de massa, é possível perceber que a pressão de compactação elevou a perda de carga, mas não alterou a trajetória dos pontos experimentais.

Os maiores valores de perda de carga percebidos para o arroz da classe longo, com compactação da massa de grãos, em relação ao arroz longo sem a compactação

da massa de grãos, podem ser atribuídos ao aumento da massa específica aparente decorrente da pressão de compactação, conforme sugerido por Cheng *et al.*, (2015).

4.4.2.1. Análise da perda de carga na aeração do arroz longo

As Figuras 31, 32 e 33 apresentam o comportamento dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, no ajustamento de coeficientes para a variação da perda de carga na aeração do arroz longo, em função da pressão de compactação de massa e do fluxo de ar, na aeração da massa de grãos.

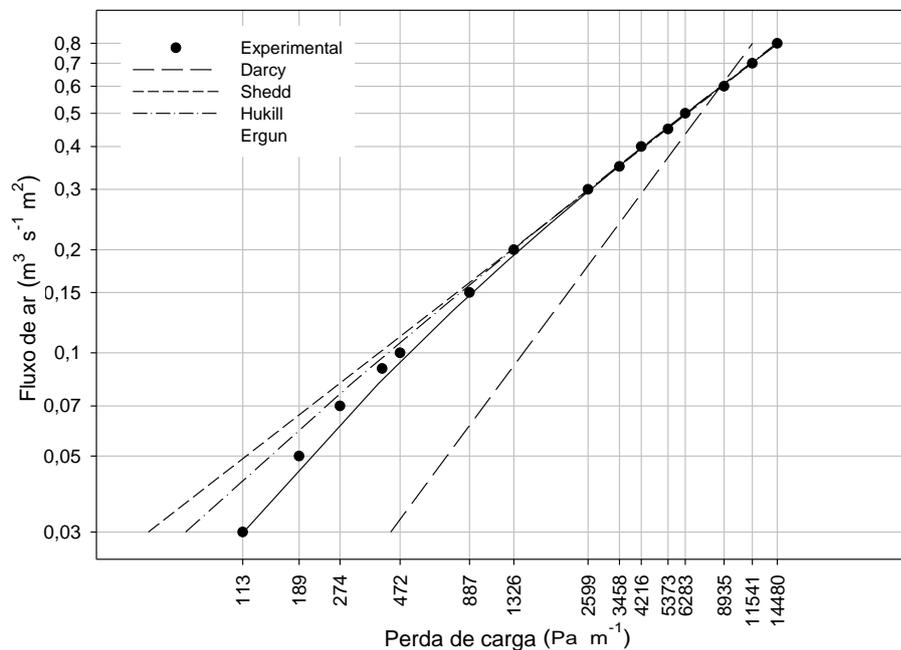


Figura 31 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, sobre os pontos experimentais de perda de carga na aeração do arroz longo, em casca, com pressão de 50 kPa na compactação da massa de grãos

Pelo comportamento da projeção dos modelos, sobre os pontos experimentais da perda de carga na aeração do arroz longo, em casca, em função da pressão de compactação da massa de grãos e do fluxo de ar, é possível verificar que o modelo de Darcy não apresentou boa acurácia sobre os pontos experimentais para todas as pressões de compactação da massa de grãos.

Para um intervalo de fluxo de ar entre 0,2 a 0,8 m³ s⁻¹ m², verifica-se que os modelos de Shedd, Hukil & Ives, e Ergun, apresentaram boa acurácia sobre os pontos experimentais. O modelo de Shedd, embora inicialmente apresente, para uma variação de fluxo de ar entre 0,03 a 0,2 m³ s⁻¹ m², um comportamento de projeção afastado dos

pontos experimentais, para todas as pressões de compactação da massa de grãos, apresenta uma proximidade muito maior em relação aos pontos experimentais quando comparado com o comportamento do modelo de Darcy.

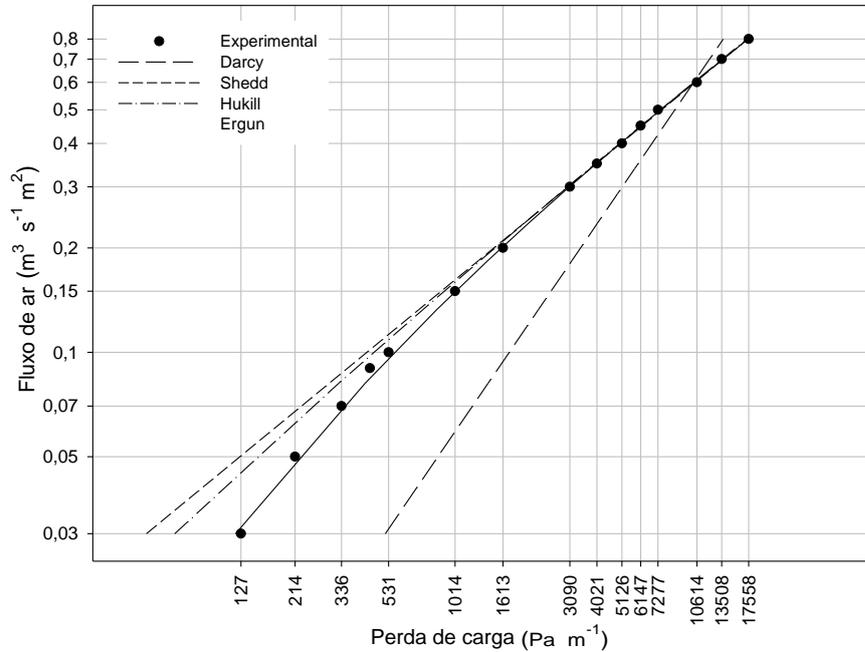


Figura 32 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, sobre os pontos experimentais da perda de carga na aeração do arroz longo, em casca, com pressão de 130 kPa na compactação da massa de grãos

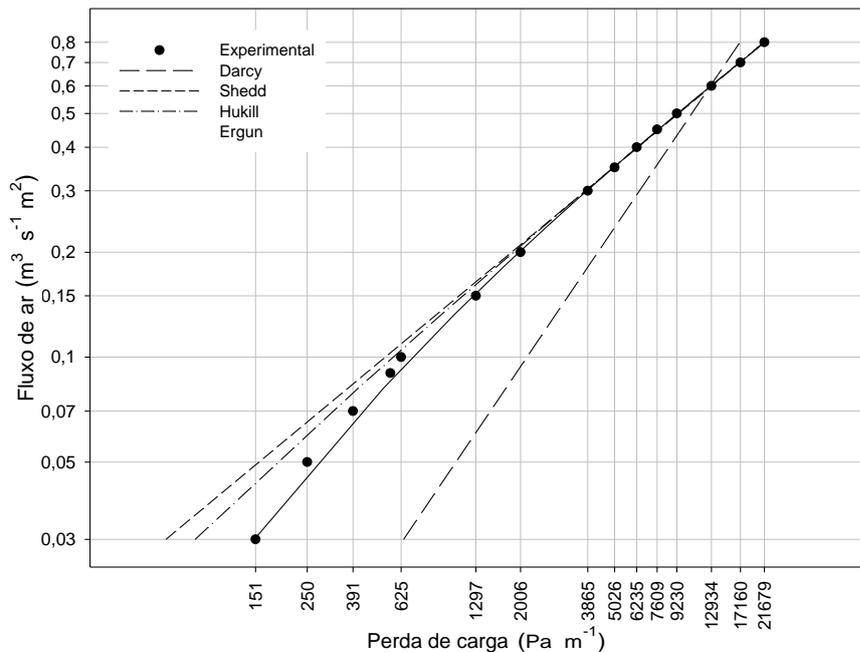


Figura 33 - Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, sobre os pontos experimentais da perda de carga na aeração do arroz longo, em casca, com pressão de 210 kPa na compactação da massa de grãos

Com um comportamento similar ao modelo de Shedd, o modelo de Hukill & Ives apresentou inicialmente uma projeção mais próxima dos pontos experimentais, para todas as pressões de compactação da massa de grãos e para um intervalo de fluxo de ar entre 0,03 a 0,2 m³ s⁻¹ m².

Apesar de se destacar, no comportamento de projeção para a pressão de compactação da massa de grãos de 130 kPa (Figura 32), devido a ocorrência do afastamento de apenas um ponto experimental na projeção do modelo, verificado para o fluxo de ar de 0,09 m³ s⁻¹ m², Ergun apresentou boa acurácia para todos os demais pontos experimentais.

Para as pressões de compactação da massa de grãos de 50 kPa e 210 kPa (Figuras 31 e 33), foram verificados os distanciamentos de quatro pontos experimentais para o intervalo de fluxo de ar 0,05 a 0,1 m³ s⁻¹ m², na projeção do modelo de Ergun.

Os parâmetros dos modelos ajustados aos dados observados de perda de carga (Pa m⁻¹) para o arroz em casca, longo, para diferentes pressões de compactação da massa de grãos em função do fluxo de ar (m³ s⁻¹ m⁻²) estão apresentados na Tabela 16, juntamente com seus respectivos valores de erro médio relativo (EMR%) e coeficiente de determinação (R²).

Tabela 16 – Parâmetros obtidos dos modelos utilizados para analisar a perda de carga na aeração do arroz longo, em casca, com compactação da massa

Modelo	Parâmetros	Pressões de compactação		
		50 kPa	130 kPa	210 kPa
Darcy	a	14.465,2 ± 357,4	17.166,0 ± 432,1	21.348,9 ± 275,0
	R ²	0,903	0,896	0,897
	EMR (%)	117,73	122,3	127,2
Shedd	a	21.393,98 ± 335,2	25.885,2 ± 887,6	32.184,85 ± 485,5
	b	1,73 ± 0,02	1,77 ± 0,02	1,77 ± 0,01
	R ²	0,999	0,999	0,999
	EMR (%)	11,9	13,7	12,8
Hukill	a	95.235,0 ± 6.282,3	131.890,9 ± 14.237,6	163.552,9 ± 9.479,7
	b	85,39 ± 29,25	165,27 ± 61,72	159,87 ± 42,23
	R ²	0,999	0,999	0,999
	EMR (%)	7,13	9,8	8,8
Ergun	a	3.241,15 ± 371,2	3.305,1 ± 193,13	4.104,5 ± 237,1
	b	18.807,7 ± 206,3	23.226,0 ± 1.036,5	28.895,6 ± 566,2
	R ²	0,999	0,999	0,999
	EMR (%)	4,8	2,9	3,8

Os resultados do ajuste dos dados experimentais de perda de carga aos modelos testados mostram que três dos quatro os modelos apresentaram elevados valores de coeficiente de determinação seguido de baixos valores de erro médio relativo. Embora o

modelo de Darcy tenha gerado valores de coeficiente de determinação razoáveis os valores de erro médio relativo encontrados não foram aceitáveis.

Verifica-se pelos valores obtidos de coeficiente de determinação e de erro médio relativo que o modelo de Ergun apresentou o melhor desempenho, seguido do modelo de Hukill & Ives. O modelo de Shedd, embora tenha apresentado bons coeficientes de determinação, não apresentou valores de erro médio aceitáveis.

4.4.3. Perda de carga na aeração do arroz curto

A Figura 34 apresenta a variação da perda de carga na aeração do arroz curto, em função da pressão de compactação da massa e do fluxo de ar, na aeração da massa de grãos.

Inicialmente, com a massa de grãos não compactada, o arroz curto apresentou uma massa específica aparente de $634,20 \pm 1,09 \text{ kg m}^{-3}$ e após atuação das pressões de compactação sobre a massa de grãos massa específica aparente aumentou para $647,25 \pm 2,98 \text{ kg m}^{-3}$ na pressão de compactação de 50 kPa, $681,40 \pm 3,32 \text{ kg m}^{-3}$ na pressão de compactação de 130 kPa, e $715,15 \pm 5,84 \text{ kg m}^{-3}$ na pressão de compactação de 210 kPa.

Estas elevações na massa específica aparente, do arroz curto, com compactação de massa, representam um acréscimo de 2,05%, 7,44% e 12,76%, respectivamente para as pressões de compactação de 50 kPa, 130 kPa e 210 kPa. Este comportamento de valores percentuais percebidos para o arroz curto é compatível com o comportamento dos valores relatados por Cheng *et al.*, (2015).

Pelo comportamento da perda de carga do arroz sem compactação de massa, em relação ao comportamento da perda de carga da massa do arroz com compactação de massa, é possível perceber que a pressão de compactação elevou a perda e carga, mas não alterou a trajetória dos pontos experimentais.

Pelo comportamento dos valores médios de pressões estática para o arroz curto, em função da pressão de compactação da massa de grãos, é possível verificar que a pressão de compactação de 50 kPa apresentou os menores valores de pressões estática, de $146,45 \text{ Pa m}^{-1}$ para o menor fluxo de ar ($0,03 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$) e de $19.692,55 \text{ Pa m}^{-1}$ para o maior fluxo de ar ($0,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$).

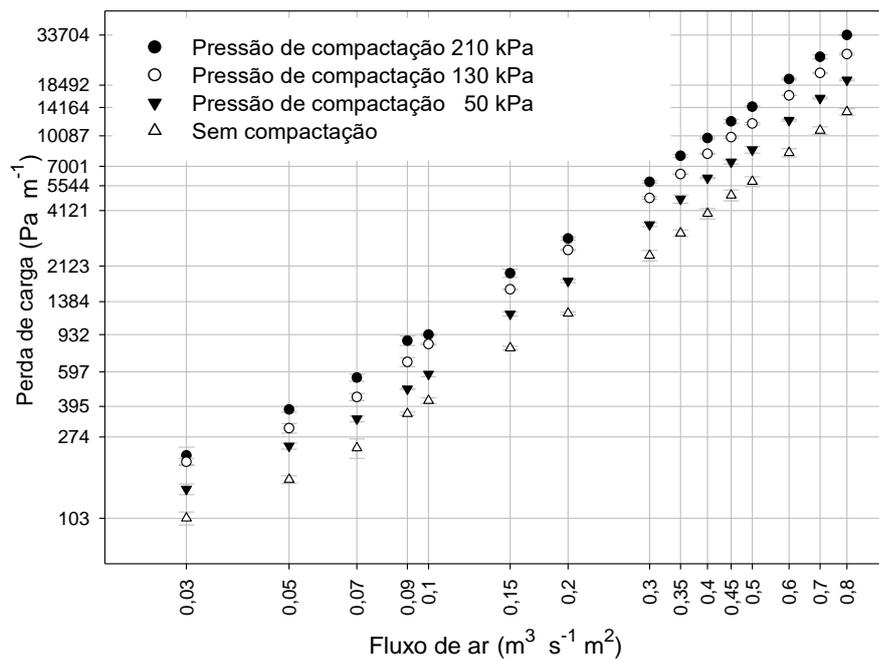


Figura 34 – Influência da pressão de compactação da massa de grãos e do fluxo de ar na perda de carga na aeração do arroz curto, em casca

Para a pressão de compactação de 130 kPa, foram verificados valores médios de pressões estática de $202,93 \text{ Pa m}^{-1}$ para o menor fluxo de ar e de $27.159,53 \text{ Pa m}^{-1}$ para o maior fluxo de ar. As maiores pressões estática foram verificadas para a pressão de compactação de 210 kPa, que apresentou valores de $219,49 \text{ Pa m}^{-1}$ para o menor fluxo de ar e de $33.704,11 \text{ Pa m}^{-1}$ para o maior fluxo de ar.

Os maiores valores de perda de carga percebidos para o arroz da classe curto, com compactação da massa de grãos, em relação ao arroz curto sem a compactação da massa de grãos, podem ser atribuídos ao aumento da massa específica aparente decorrente da pressão de compactação, conforme sugerido por Cheng *et al.*, (2015).

A massa específica aparente de $647,25 \pm 2,98 \text{ kg m}^{-3}$, $681,40 \pm 3,32 \text{ kg m}^{-3}$ e $715,15 \pm 5,84 \text{ kg m}^{-3}$, resultantes de suas respectivas pressões de compactação, produziram em relação ao arroz curto, sem compactação da massa de grãos, em média, um aumento percentual de perda de carga de $40,98 \pm 2,55\%$, $92,15 \pm 3,98\%$ e $127,33 \pm 4,54\%$, para um fluxo de ar de $0,03$ a $0,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$, e $49,37 \pm 2,55\%$, $102,30 \pm 3,96\%$ e $155,33 \pm 3,97\%$, para um fluxo de ar de $0,15$ a $0,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$.

Os percentuais de incremento de perda de carga entre as pressões de compactação de 50 e 130 kPa, 130 e 210 kPa e 50 e 210 kPa, foram de respectivamente $36,51 \pm 3,56\%$, $18,45 \pm 1,48\%$ e $59,74 \pm 4,55\%$ para um fluxo de ar de $0,03$ a

0,1 m³ s⁻¹ m², e de 36,36 ± 3,15%, 21,30 ± 2,60% e 65,37 ± 3,05% para um fluxo de ar de 0,15 a 0,8 m³ s⁻¹ m².

4.4.3.1. Análise da perda de carga na aeração do arroz curto

As Figuras 35, 36 e 37 apresentam o comportamento dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, no ajustamento de coeficientes para a variação da perda de carga na aeração do arroz curto, em função da pressão de compactação de massa e do fluxo de ar, na aeração da massa de grãos.

Através do comportamento da projeção dos modelos utilizados para representar a perda de carga na aeração do arroz curto, em casca, em função da pressão de compactação da massa de grãos e do fluxo de ar, é possível verificar que o modelo de Darcy não foi capaz de descrever com razoabilidade o comportamento dos pontos experimentais para todas as pressões de compactação da massa de grãos.

O modelo de Shedd, embora inicialmente apresente, para uma variação de fluxo de ar entre 0,03 a 0,2 m³ s⁻¹ m², um comportamento de projeção afastado dos pontos experimentais, para todas as pressões de compactação da massa de grãos, apresenta uma proximidade muito maior em relação aos pontos experimentais quando comparado com o comportamento do modelo de Darcy.

Com um comportamento similar ao modelo de Shedd, o modelo de Ergun apresentou inicialmente uma projeção um pouco mais próxima dos pontos experimentais, para a pressão de compactação da massa de grãos de 210 kPa (Figura 36) e para um intervalo de fluxo de ar entre 0,03 a 0,2 m³ s⁻¹ m². Para as pressões de compactação da massa de grãos de 50 e 130 kPa (Figuras 35 e 37) o modelo de Ergun apresentou uma projeção um pouco mais afastada dos pontos experimentais, para o mesmo intervalo de fluxo de ar mencionado.

Apesar de se destacar, no comportamento de projeção para a pressão de compactação da massa de grãos de 130 kPa (Figura 38), devido a ocorrência do distanciamento de apenas um ponto experimental na projeção do modelo, verificado para o fluxo de ar de 0,03 m³ s⁻¹ m², Hukill & Ives apresentou boa acurácia para todos os demais pontos experimentais.

Com um comportamento similar ao modelo de Shedd, o modelo de Ergun apresentou inicialmente uma projeção um pouco mais próxima dos pontos

experimentais, para a pressão de compactação da massa de grãos de 210 kPa (Figura 36) e para um intervalo de fluxo de ar entre 0,03 a 0,2 $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^2$.

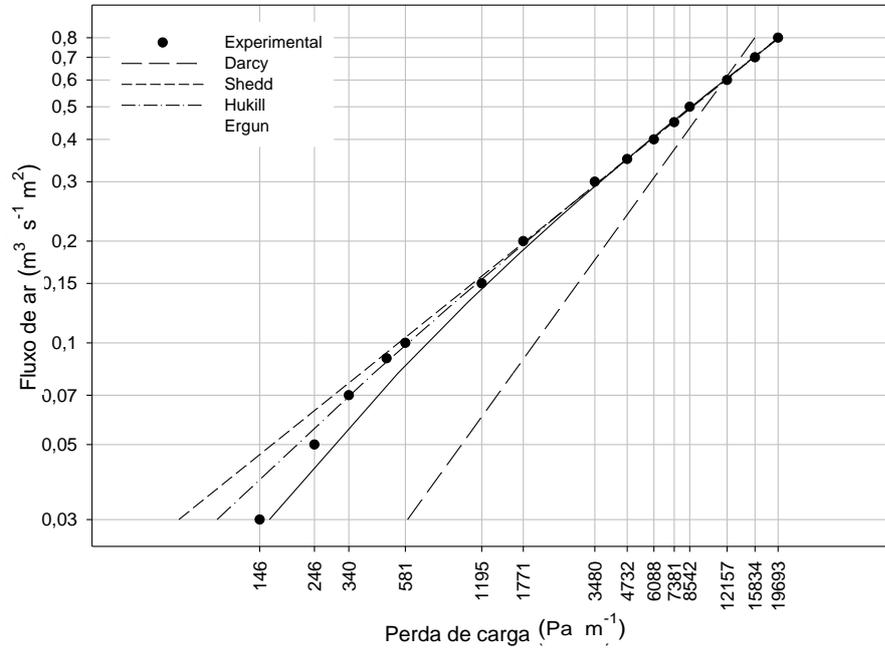


Figura 35 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, sobre os pontos experimentais de perda de carga na aeração do arroz curto, em casca, com pressão de 50 kPa na compactação da massa de grãos

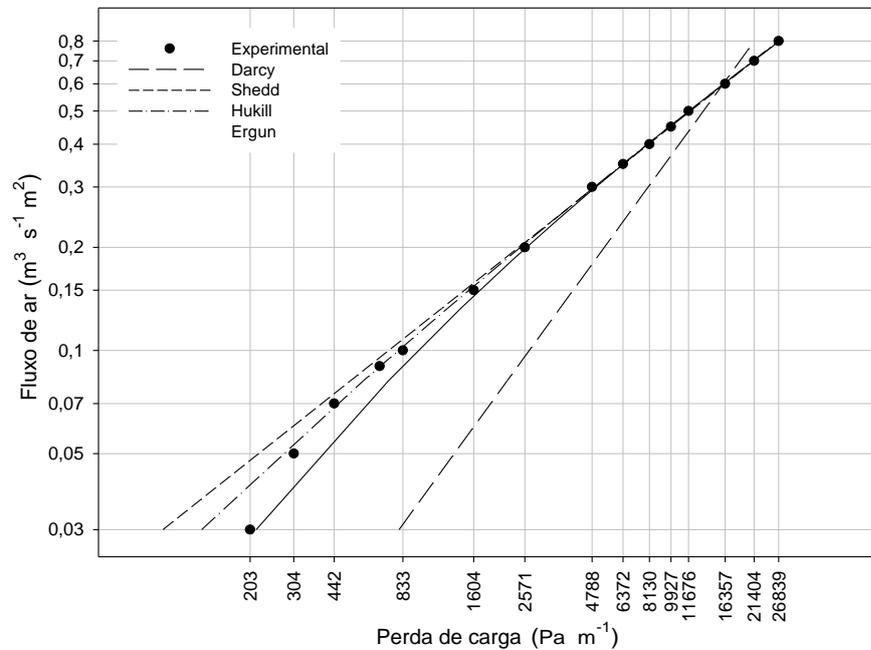


Figura 36 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, sobre os pontos experimentais de perda de carga na aeração do arroz curto, em casca, com pressão de 130 kPa na compactação da massa de grãos

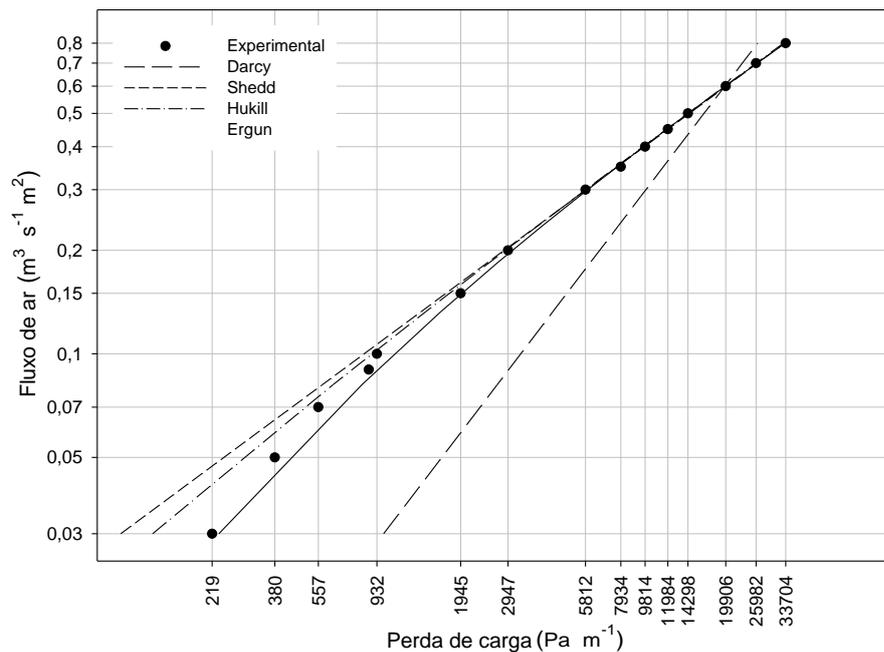


Figura 37 – Projeção dos modelos de Darcy, Shedd, Hukill & Ives, e Ergun, sobre os pontos experimentais de perda de carga na aeração do arroz em casca, curto, com pressão de 210 kPa na compactação da massa de grãos

Para as pressões de compactação da massa de grãos de 50 e 130 kPa (Figuras 35 e 37) o modelo de Ergun apresentou uma projeção um pouco mais afastada dos pontos experimentais, para o mesmo intervalo de fluxo de ar mencionado.

Apesar de se destacar, no comportamento de projeção para a pressão de compactação da massa de grãos de 130 kPa (Figura 38), devido a ocorrência do distanciamento de apenas um ponto experimental na projeção do modelo, verificado para o fluxo de ar de $0,03 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$, Hukill & Ives apresentou boa acurácia para todos os demais pontos experimentais.

Para as pressões de compactação da massa de grãos de 50 kPa e 210 kPa (Figuras 35 e 37), foram verificados o distanciamento, respectivamente, de dois pontos experimentais para o intervalo de fluxo de ar de $0,03$ a $0,05 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$, e de quatro pontos experimentais para o intervalo de fluxo de ar de $0,03$ a $0,09 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$, na projeção do modelo de Hukill & Ives.

O modelo de Hukill & Ives apresentou uma projeção mais assertiva sobre os pontos experimentais do arroz curto, em casca, com compactação da massa de grãos, em relação a projeção do modelo para o arroz curto, em casca, sem compactação da massa de grãos (Figura 34).

Os parâmetros dos modelos ajustados aos dados observados de perda de carga (Pa m^{-1}) para o arroz curto, em casca, para diferentes pressões de compactação da massa de grãos em função do fluxo de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$) estão apresentados na Tabela 17, juntamente com seus respectivos valores de erro médio relativo (EMR) e coeficiente de determinação (R^2). Os resultados do ajuste dos dados experimentais de perda de carga aos modelos testados mostram que três dos quatro os modelos apresentaram elevados valores de coeficiente de determinação seguido de baixos valores de erro médio relativo.

Tabela 17 – Parâmetros obtidos dos modelos utilizados para analisar a perda de carga na aeração do arroz curto, em casca, com compactação da massa

Modelo	Parâmetros	Pressões de compactação		
		50 kPa	130 kPa	210 kPa
Darcy	a	19.774,64 ± 208,6	26.807,28 ± 152,91	32.946,17 ± 275,0
	R^2	0,905	0,904	0,897
	EMR (%)	127,53	128,12	133,1
Shedd	a	29.086,02 ± 278,6	39.541,4 ± 545,5	49.571,9 ± 324,12
	b	1,72 ± 0,02	1,73 ± 0,02	1,77 ± 0,02
	R^2	0,999	0,999	0,999
	EMR (%)	9,2	9,0	11,1
Hukill	a	125.525,7 ± 8153,3	173.001,1 ± 13.406,3	249.022,8 ± 16.598,5
	b	72,38 ± 17,9	77,40 ± 21,0	153,32 ± 55,5
	R^2	0,999	0,999	0,999
	EMR (%)	6,0	4,8	7,0
Ergun	a	4.585,1 ± 269,6	6.120,0 ± 460,98	6.425,6 ± 488,3
	b	25.452,3 ± 472,6	23.226,0 ± 1.036,5	44.439,3 ± 503,5
	R^2	0,999	0,999	0,999
	EMR (%)	9,7	8,5	5,6

Embora o modelo de Darcy tenha gerado valores de coeficiente de determinação razoáveis os valores de erro médio relativo encontrados não foram aceitáveis. O modelo de Shedd, embora tenha apresentado elevados coeficientes de determinação, não apresentou valores de erro médio relativo menores que os demais modelos.

Verifica-se pelos valores obtidos de coeficiente de determinação e de erro médio relativo que o modelo de Ergun e de Hukill & Ives apresentaram uma equivalência desempenho, entretanto pela proximidade de valores e recorrência de melhor desempenho o modelo de Ergun pode ser sugerido como o mais adequado.

5. CONCLUSÕES

5.1. Quanto maior for a pressão de compactação, maior será o aumento de massa específica aparente final e maior será a queda da pressão na aeração, ocorrendo os maiores acréscimos de massa específica aparente final e de percentuais de compactação no arroz da classe de grãos curtos, seguido do arroz de grãos longos e longos finos.

5.2. A queda da pressão provocada pela compactação gera, em relação à massa de grãos não compactada, para a menor, e a maior pressão de compactação, incrementos que variaram em média 32% a 87% para o arroz longo fino, 39% a 90% para o arroz longo e 45% a 139% para o arroz curto.

5.3. Pelos incrementos de perda de carga na aeração do arroz em casca, verificados para a compactação da massa de grãos, a perda de carga estimada pelos modelos de Shedd e Hukill & Ives, para um fluxo de ar até $0,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$, deve ser acrescida de 50% para o arroz de grãos das classes longo fino e longo, e de 60% para o arroz de grãos da classe curto.

5.4. Com comportamento semelhante entre os valores de erro médio relativo, entre os modelos de Ergun e Hukill & Ives, e ambos com erro médio relativo menor do que o modelo de Shedd, é possível assumir que Ergun é o modelo com melhor desempenho por apresentar valores preditivos de perda de carga imediatamente superiores aos valores experimentais.

5.5. A modificação no comportamento da dinâmica do processo de compactação independe da classe de grãos, havendo o maior incremento de massa específica aparente nos instantes iniciais e necessidade de mais tempo para estabilizar a deformação da massa de grãos com o aumento da pressão de compactação.

5.6. Todos os modelos utilizados para analisar alterações da massa específica aparente na compactação da massa de grãos, independentemente da classe do arroz, apresentam bom desempenho, entretanto o modelo proposto por Cheng *et al.*, (2017) apresenta melhor acurácia nos valores estimados de massa específica aparente final e os menores valores de erro médio relativo, seguido do modelo de Johanson.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, J. M. **Storage loss assessment techniques: A biologist view**. Tropical Products Institute, paper presented at GASGA Seminar. London, Feb 6-7, 1973.

AFONSO, A. D. L. **Gradiente de pressão estática em camadas de frutos de café (Coffea arábica L.) com diferentes teores de umidade**. (Dissertação) UFV, 68p. 1994.

AL-YAHYA S. A.; MOGHAZI H. M. M. Static pressure drop through barley grain. **Canadian Agricultural Engineering**, 40(2), p. 213 – 217, 1998.

ASABE. Resistance to Airflow of Grains, Seeds, Other Agricultural Products, and Perforated Metal Sheets. **ASAE Standards**, p. 528 – 534, 1998.

ASABE. Standards for resistance to airflow of grains, seeds, and other agricultural products, and perforated metal sheets. **ASABE Press**, St. Joseph, MI, USA. 2007.

ASABE. **Thin-layer drying of agricultural crops**. St. Joseph, Mich.: ANSI/ASAE S448.2.: (2014).

ASAE. American Society of Agricultural Engineers. **Moisture measurement unground grain and seeds**. In: Standards, 2000. St. Joseph: ASAE, 563p. 2000.

BIAGGIONI, M. A. M.; PIZA, P. L. B. T.; FERREIRA, W. A. Queda de pressão estática por meio de uma couda de noz de macadâmia. **Engenharia Agrícola**, v. 25, p. 499 – 507, 2005.

BHATTACHARYA, K. R.; SOWBHAGYA, C. M.; INDUDHARA. S. Y. M. Some physical properties of paddy and rice and their interrelations. **J Sci Food Agric.**, v. 23(2): p. 171–186, 1972.

BHADRA, R.; CASADA, M. E.; BOAC, J. M.; TURNER, A. P.; THOMPSON, S. A.; MONTROSS, M. D.; MAGHIRANG, R. G.; MCNEILL, S. G. Correlating bulk density (with

dockage) and test weight (without dockage) for wheat samples. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 32(6), p. 925 – 930, 2016.

BLIGHT, G. **Geotechnical engineering for mine waste storage facilities**. Leiden, Netherlands: CRC Press, Taylor & Francis Group, 652p. 2010.

BOTELHO, F. M.; FARIA, B. M. E. M.; BOTELHO, S. C. C.; RUFFATO, S.; MARTINS, R. N. Metodologias para determinação de massa específica de grãos. **Revista agrária**, v. 11, n. 41, Dourados-MS, p. 251 – 259, 2018.

BRASIL. **Regras para análise de sementes**. Ministério da agricultura pecuária e abastecimento (MAPA). Brasília. 398p. 2009a. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/assuntos/insumos-agropecuarios/arquivos-publica-coes-insumos/2946_regras_analise__sementes.pdf. Acessado em: 20 de nov. 2017.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa Nº 6**. Diário Oficial da União, Seção 1, p. 3, 2009b.

CENKOWSKI, S. AND ZHANG, Q. Engineering properties of grains and oil seeds. In: **Stored grain ecosystems**, p. 411 – 463, 1995.

CHANG, C. S., SHACKELFORD, L. E.; LAI, F. S.; MARTIN, C. R. AND MILLER, B. S. Bulk properties of corn as affected by multiple-point grain spreaders. **Transactions of the ASAE**, 26(6): p. 1632 – 1636, 1981.

CHANG, C. S.; CONVERSE, H. H.; AND MARTIN, C. R. Bulk properties of grain as affected by self-propelled type grain spreaders. **Transactions of the ASAE**, 26(5): p. 1543 – 1550, 1983.

CHENG, X.; ZHANG, Q.; YAN, X. & SHI, C. Compressibility and equivalent bulk modulus of shelled corn. **Biosystems Engineering**, v.140, p. 91 – 97, 2015.

CHENG, X.; ZHANG, Q.; SHI, C.; YAN, X. Model for the prediction of grain density and pressure distribution in hopper-bottom silos. **Biosystems engineering**, v. 163, p. 159 – 166, 2017.

DEVILLA, I. A.; COUTO, S. M.; QUEIROZ, D. M. Distribuição do fluxo de ar em silos com sistema de aeração: Análise por elementos finitos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 256 – 262, 2005.

ELIAS, M.C.; OLIVEIRA, M.; LANG, G.H.; VANIER, N.L. **Certificação de Unidades Armazenadoras de Grãos e Fibras no Brasil**. 3 ed. Pelotas: Santa Cruz, v. 1. 375p. 2017.

ELIAS, M.C.; OLIVEIRA, M.; VANIER, N.L. Fatores que influenciam a aeração e o manejo da conservação de grãos no armazenamento. In: LORINI, I.; MIKE, L.H.; SCUSSEL, V.M.; FARONI, L.R.D. (Org.). **Armazenagem de grãos**. 2 ed. Jundiaí, SP: Instituto Bio Geneziz, v. I, p. 279 – 326, 2018.

ELIAS, M.C.; OLIVEIRA, M.; VANIER, N.L. **Qualidade de arroz na pós-colheita e na agroindústria: análise, conservação e tipificação**. 1 ed. Pelotas: Pelotas, v. 250. 221p. 2015.

EL-KHAIARY, M. I.; MALASH, G. G. Common data analysis errors in batch adsorption studies. **Hidrometallurgy**, v. 105, p. 314 – 320, 2011.

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. **Chem. Eng. Prog.**, 48(2), p. 89 – 94, 1952.

FASINA, O. F. **Physical properties of peanut hull pellets**. ASABE paper nº. 076161. St. Joseph, Mich.: ASAE. 2007.

GINER, S.A.; DENISIENIA, E. Pressure drop through wheat as affected by air velocity, moisture content and fines. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 63, p. 73 – 86, 1996.

GONELI, A. L. D. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da manona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento.** (Tese de Doutorado), Viçosa: UFV, 199p. 2008.

GÓRNICKI, K.; KALETA, A. Resistance of bulk grain to airflow – a review. Part I: Equations for airflow resistance. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Agricultural and Forest Engineering*, n. 65, p. 31 – 41, 2015.

HAQUE, E.; AHMED, Y. N.; DEYOE, C. W. Static pressure drop in a fixed bed of grain as affected by grain moisture content. *American Society of Agricultural Engineers, Transactions of the ASAE*, v. 25, p.1095 – 1098, 1982.

HAQUE, E. Void fraction as a function of depth and pressure drops of packed beds of porous media formed by granular material. *Trans Am Soc Agric Biol*, 54(6), p. 2239 – 2243, 2011.

HAQUE, E. Estimating bulk density of compacted grains in storage bins and modifications of Janssen's load equations as affected by bulk density. *Food Science & Nutrition*, 1(2), p. 150 – 156, 2013.

HUSAIN, A.; OJHA, T. P. Resistance to the Passage of Air through Rough Rice. *J. agric. Eng. Res.*, 14(1), p. 47 – 53, 1969.

INSTRUTEMP – Empresa de instrumentos de medição. Disponível em: <<https://www.instrutemp.com.br/produto/1309/termoanemometro++testo+405>>. Acesso em: 10 dez. 2018.

JANSSEN, H. A. Versuche uber Getreidedruck in Silozellen. *Zeitschr. D. Vereines Deutscher Ingenieure*, v. 39, p. 1045 – 1049, 1895.

JOHANSON, J. R. AND COX, B. D., *Powder Handling Process.*, v. 1, p. 61, 1989.

KARABABA, E. Physical properties of popcorn kernels. *J Food Eng.*, v. 72, p. 100 – 107, 2006.

KASHANINEJAD, M.; TABIL, L. G. Resistance of bulk pistachio nuts (Ohadi variety) to airflow. **Journal of Food Engineering**, v. 90, p. 104 – 109, 2009.

LASSERAN, J. C. **Aeração de grãos**. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 128p. 1981.

LOEWER, O. J.; BRIDGES, T. C.; BUCKLIN, R. A. **On-Farm drying and storage systems**. American Society of Agricultural Engineers, 560p. 1994.

LUKASZUK, J.; MOLENDAS, M.; HORABIK, J.; SZOT, B.; MONTROSS, M. D. Airflow resistance of wheat bedding as influenced by the filling method. **J. Agric. Eng. Res.**, 54(2), p. 50 – 57, 2008.

MALM, J. K.; AND BAKER, L. F. Compaction factors for six crops. **Transactions of the ASAE**, 28(5): p. 1634 – 1636, 1985.

MANSOURI, A.; MIRZABE, A. H.; & RAUFI, A. Physical properties and mathematical modeling of melon (*Cucumis melo* L.) seeds and kernels. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, 16, p. 218 – 226, 2017.

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials: Structure, physical characteristics, and mechanical properties**. New York, NY: Gordon and Breach Publisher. 1986.

MOLENDAS, M.; LUKASZUK, J.; HORABIK, J. Airflow resistance of wheat as affected by grain density and moisture content. **Electronic Journal of Polish Agricultural Universities**, 8(4): #67, 2005a. Disponível em: <<http://www.ejpau.media.pl/volume8/issue4/art-67.html>>. Acessado em: 15 jan. 2019.

MOLENDAS, M.; MONTROSS, M. D.; MCNEILL, S. G.; HORABIK, J. Airflow resistance of seeds at different bulk densities using ergun's equation. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 48(3), p. 1137 – 1145, 2005b.

MONTROSS, M. D. AND MCNEILL, S. G. Permeability of Corn, Soybeans, and Soft Red and White Winter Wheat as Affected by Bulk Density. **Applied Engineering in Agriculture**, 21(3): p. 479 – 484, 2005.

MUIR, W. E.; CENKOWSKI, S. AND ZHANG, Q. **Physical characteristics of grain bulks**. In: Grain Preservation Biosystems. 2005.

NALLADURAI, K.; ALAGUSUNDARAM, K.; GAYATHRI, P. Airflow resistance of paddy and its byproducts. **Biosystems Engineering**, v. 83, n. 1, p. 67 – 75, 2002.

NAVARRO, S. AND NOYES, R. **The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management**. Boca Raton, 647p, 2002.

NEETHIRAJAN, S.; C. KARUNAKARAN.; JAYAS, D. S. AND WHITE, N. D. G. X- ray computed tomography image analysis to explain the airflow resistance differences in grain bulks. **Biosystems Engineering**, 94: p. 545 – 555, 2006.

NIMKAR, P. M. AND CHATTOPAHYAY, P. K. Airflow resistance of green gram. **Biosystems Engineering**, 82(4): p. 407 – 414, 2002.

OLIVEIRA, M.; BERTINETTI, I.A.; VILLANOVA, F.A.; CAMARGO, C.M.; ELIAS, M.C. Manejo da conservação do arroz no armazenamento. In: ELIAS, M.C.; OLIVEIRA, M. VANIER, N.L. (Org.). **Qualidade de arroz na pós-colheita e na agroindústria: análise, conservação e tipificação**. 1 ed. Pelotas: Editora Santa Cruz, v. I, p. 19 – 68. 2015.

OVERHULTS, D. G.; WHITE, G. H.; HAMILTON, H. E. & ROSS, I. J. Drying soybeans with heated air. **Trans. ASAE**, 16(1), p. 112 – 113, 1973.

PABIS, S.; JAYAS D. S.; CENKOWSKI, S. **Grain drying. Theory and practice**. John Wiley & Sons, New York. 1998.

ROSS, I. J.; BRIDGES, T. C.; LOEWER, O. J. AND WALKER, J. N. Grain bin loads as affected by grain moisture and vertical pressure. **Transactions of the ASAE**, 22(3): p. 592 – 597, 1979.

- SHAHBAZI, F. Resistance of bulk chickpea seeds to airflow. **J. Agric. Sci. Tech**, 13: p. 996 – 676, 2011.
- SHEDD, C. K. Resistance of grains and seeds to airflow. **Agric. Eng.** v. 34(9), p. 616 – 619, 1953.
- SILVA, N. C. L.; MATOS, A. T.; SARTORI, M. A.; MOREIRA, D. A.; BARROS, R. T. P.; LUIZ, F. A. R. Variação na pressão estática de ar insuflado em diferentes vazões específicas em colunas de material orgânico com diferentes estádios de degradação bioquímica. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, p.165 – 170, 2008.
- STEFFE, J. F. **Rheological methods in food process engineering**. East Lansing, Mich.: Freeman. 1992.
- STEINBOCK, J.; WEISSENBRUNNER, A.; JULING, M.; LEDERER, T.; THAMSEN, P. U. Uncertainty evaluation for velocity–area methods. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 48, p. 51 – 56, 2016.
- STEPHENS, L. E. AND FOSTER, G. H. Grain bulk properties as affected by mechanical grain spreader. **Transactions of the ASAE**, 19(2): p. 358 – 363, 1976.
- STUART, O. N. Moisture-dependent kernel and bulk density relationship for wheat and corn. **Transaction of the ASAE**, v. 23(1): p.139 – 143, 1980.
- THOMPSON, R. A. AND ISAAC, S. G. W. Porosity Determinations of Grains and Seeds with an Air-Comparison Pycnometer. **Transactions of the Asae**, Journal series of the Purdue Agricultural Experiment Station, nº 2840, Chicago, 1967.
- THOMPSON, S. A. AND I. J. ROSS. Compressibility and frictional coefficients of wheat. **Trans. ASAE**, 26: p.1171 – 1180, 1983.
- THOMPSON, S. A.; MCNEILL, S. G.; ROSS, I. J. & BRIDGES, T. C. Packing Factors of Whole Grains in Storage Structures. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 3(2): p. 215 – 221, 1987.

THOMPSON, S. A.; MCNEILL, S. G.; ROSS, I. J., AND BRIDGES, T. C. Computer model for predicting the packing factors of whole grains in flat storage structures. **Appl. Eng. Agric.**, v. 6, p. 465 – 470, 1990.

THOMPSON, S. A.; SCHWAB, C. V. AND ROSS, I. J. Calibration of a model for packing whole grains. **Appl. Eng. Agric.**, v.7, p. 450 – 456, 1991.

TURNER, A. P.; MONTROSS, M. D.; MCNEILL, S. G.; SAMA, M. P.; CASADA, M. E.; BOAC, J. M.; BHADRA, R.; MAGHIRANG, R. G.; THOMPSON, S. A. Modeling the compressibility behavior of hard red wheat varieties. **Transactions of the ASABE**, v. 59(3): p. 1029 – 1038, 2016.

USDA-GIPSA. Inspecting grain: Practical procedures for grain handlers. Washington, DC: USDA **Grain Inspection, Packers and Stockyards Administration**. Federal Grain Inspection Service. Weighing Handbook, Dec 27, 317p. 2010.

VANIER, N.L.; LINDEMANN, I. S.; POHNDORF, R.S.; OLIVEIRA, M.; ELIAS, M.C. **Classificação oficial, pós-colheita e industrialização de arroz**. 1. ed. Pelotas: Editora Santa Cruz, v. 1. 420p. 2017.

WENYIN, LI & SOKHANSANJ, S. Generalized equation for airflow resistance of bulk grains with variable density, moisture content and fines. **Drying Technology: An International Journal**, (12)3: p. 649 – 667, 1994.

YANG, X.; WILLIAMS, D. L. Airflow resistance of grain sorghum as affected by bulk density. American Society of Agricultural Engineers, **Trans. ASAE**, v. 33, n. 6, p. 1966 – 1970, 1990.

YUICHI, H.; AND OGUCHI, T. Evaluation of gravel sphericity and roundness based on surface area measurement with a laser scanner. **Computer and Geoscience**, v. 31. p. 735 – 741, 2005.