

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Marcela Trojahn Nunes

**INFLUÊNCIA DOS TEORES DE ÁGUA E IMPUREZAS NA  
QUALIDADE DE GRÃOS DE ARROZ SUBMETIDOS À  
SECAGEM ESTACIONÁRIA**

Santa Maria, RS  
2021

**Marcela Trojahn Nunes**

**INFLUÊNCIA DOS TEORES DE ÁGUA E IMPUREZAS NA QUALIDADE DE  
GRÃOS DE ARROZ SUBMETIDOS À SECAGEM ESTACIONÁRIA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi

Santa Maria, RS  
2021

Nunes, Marcela  
Influência dos teores de água e impurezas na  
qualidade de grãos de arroz submetidos à secagem  
estacionária / Marcela Nunes.- 2021.  
61 p.; 30 cm

Orientador: Paulo Carteri Coradi  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2021

1. Pós-colheita 2. Qualidade 3. Secagem estacionária  
4. Movimentação de ar 5. Limpeza de retificação I. Carteri  
Coradi, Paulo II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, MARCELA NUNES, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Marcela Trojahn Nunes**

**INFLUÊNCIA DOS TEORES DE ÁGUA E IMPUREZAS NA QUALIDADE DE  
GRÃOS DE ARROZ SUBMETIDOS À SECAGEM ESTACIONÁRIA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

**Aprovado em 29 de Junho de 2021:**



Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi  
UFSM Campus Cachoeira do Sul  
SIAPE 1895482

---

**Paulo Carteri Coradi, Dr. (UFSM) – Videoconferência**  
(Presidente/Orientador)



---

**Ivano Alessandro Devilla, Dr. (UEG) – Videoconferência**



---

**Maurício de Oliveira, Dr. (UFPEL) – Videoconferência**

Santa Maria, RS  
2021

## **Dedicatória**

*À minha família pelo amor e auxílio nesta jornada.*

## **Agradecimentos**

À vida e à Deus pela oportunidade de crescimento e aprimoramento.

Aos meus pais pelo amor infinito, por estarem sempre ao meu lado, me amando, protegendo e encorajando a enfrentar os desafios.

À minha irmã, por todos os conselhos e incentivos ao longo da minha vida, e principalmente por ser minha referência.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi pela amizade e pela oportunidade de aprendizado a que me confiou, muito obrigada pelo apoio, confiança, oportunidades concedidas, conselhos, e sobretudo, pela orientação, para que pudesse concluir esta importante etapa da minha formação.

Aos colegas do Laboratório de Pós-Colheita (LAPOS), pelo auxílio recebido, dicas e conhecimentos compartilhados.

À Universidade Federal de Santa Maria e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do mestrado.

E a todos, que de alguma forma contribuíram para que fosse possível a realização e conclusão desta importante etapa em minha vida.

Muito obrigada!

## Epígrafe

*O que vale na vida não é o ponto de partida e sim a caminhada. Caminhando e semeando, no fim terás o que colher.*

*(Cora Coralina)*

## RESUMO

### INFLUÊNCIA DOS TEORES DE ÁGUA E IMPUREZAS NA QUALIDADE DE GRÃOS DE ARROZ SUBMETIDOS À SECAGEM ESTACIONÁRIA

AUTOR: Marcela Trojahn Nunes  
ORIENTADOR: Paulo Carteri Coradi

O arroz (*Oryza sativa*) é um dos principais alimentos da população mundial, possuindo o amido como nutriente principal. A secagem é considerada uma das etapas mais importante no beneficiamento de grãos, a qual tem por objetivo a redução do teor de água a níveis que permitam a preservação segura e estabilidade. Entretanto, a composição dos grãos e sua qualidade pode sofrer alterações devido ao inadequado manejo de secagem. O silo armazenador com fluxo de ar para secagem possui como vantagem a possibilidade de armazenar e secar o produto ao mesmo tempo, porém nota-se desuniformidade na distribuição do ar de secagem, principalmente quando há o excesso de impurezas, prejudicando a qualidade dos grãos. A pesquisa visa avaliar o desempenho da movimentação do ar de secagem na massa de grãos de arroz armazenados em silos armazenadores com fluxo de ar para secagem em função da variação dos teores de água e impurezas. A pesquisa foi realizada em um complexo de armazenagem, realizando três experimentos, análise da movimentação na coluna de grãos, qualidade dos grãos de arroz armazenados com diferentes teores água e impurezas e movimentação de ar através de diferentes operações de limpeza de retificação na massa de grãos. Para análise da qualidade dos grãos em diferentes pontos do silo armazenador com fluxo de ar para secagem, foi utilizado o princípio do delineamento inteiramente casualizado, fatorial (4x11), com três repetições de amostragem, seguido de teste Tukey a 5% de probabilidade, utilizando diferentes técnicas, Espectroscopia de Infravermelho Próximo (NIR), Difração de Raio-X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), para verificação da qualidade físico-química do arroz. Todos os silos apresentaram um baixo rendimento de secagem. Ao observar o fluxo de ar durante o carregamento do silo identificou-se redução da vazão do ar e vazão específica do ar, enquanto que a houve aumento da pressão estática. Nos silos em que não houve o processo completo de limpeza de retificação, ocorreu aumento na pressão estática, ocorrendo maior saída do ar em pontos específicos, interferindo na distribuição do ar e na secagem. Ao analisar a influência da relação do teor de água e impureza dos grãos armazenados, a relação 19U/1,5I revelou maior rendimento, bem como menor quantidade de grãos com defeitos, quebrados e gessados. Também foi possível identificar que a camada inferior dos silos armazenadores com fluxo de ar para secagem nos tratamentos 19U/1,5I, 18U/2,0I e 17U/2,5I tiveram a qualidade física dos grãos prejudicada, pela alta temperatura, em decorrência da formação de uma frente de secagem. Ao analisar os grãos de arroz com alto teor de amido pela MEV, verificou-se que estes possuem maior tendência de formação rugosidades na sua estrutura. No entanto, o teor de amido não apresentou relação direta com o índice de cristalinidade. Permitindo identificar que o manejo inadequado do silo armazenador com fluxo de ar para secagem interfere na secagem dos grãos e que a falta de cuidados anterior ao armazenamento pode prejudicar a qualidade final do produto, visto que o sistema possui limitações técnicas na movimentação do ar de secagem.

**Palavras-chave:** Pós-colheita. Qualidade. Movimentação de ar. Limpeza de retificação.

## ABSTRACT

### INFLUENCE OF WATER AND IMPURITY CONTENT ON THE QUALITY OF RICE GRAIN SUBMITTED TO STATIONARY DRYING

AUTHOR: Marcela Trojahn Nunes

ADVISOR: Paulo Carteri Coradi

Rice (*Oryza sativa*) is one of the main foods of the world population, having starch as the main nutrient. Drying is considered one of the most important steps in grain processing, which aims to reduce the water content to levels that allow for safe preservation and stability. However, grain composition and quality may change due to inadequate drying management. The storage silo with air flow for drying has the advantage of being able to store and dry the product at the same time, but there is unevenness in the distribution of the drying air, especially when there is an excess of impurities, impairing the quality of the grains. The research aims to evaluate the performance of drying air movement in the mass of rice grains stored in storage silos with air flow for drying as a function of water and impurity content variation. The research was carried out in a storage complex, carrying out three experiments, analysis of movement in the grain column, quality of rice grains stored with different water and impurities contents and air movement through different cleaning operations of grinding in the grain mass. To analyze the quality of the grains at different points of the storage silo with air flow for drying, the principle of a completely randomized, factorial (4x11) design was used, with three sampling repetitions, followed by Tukey test at 5% probability, using different techniques, Near Infrared Spectroscopy (NIR), X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM), to verify the physicochemical quality of rice. All silos showed a low drying performance. When observing the air flow during silo loading, a reduction in air flow and specific air flow was identified, while there was an increase in static pressure. In silos where there was no complete grinding cleaning process, there was an increase in static pressure, with greater air output at specific points, interfering with air distribution and drying. When analyzing the influence of the water content and impurity ratio of the stored grains, the 19U/1.5I ratio revealed a higher yield, as well as a lower amount of grains with defects, broken and plastered. It was also possible to identify that the lower layer of the storage silo with air flow for drying in the 19U/1.5I, 18U/2.0I and 17U/2.5I treatments had the physical quality of the grains impaired, due to the high temperature, as a result the formation of a drying front. When analyzing rice grains with high starch content by SEM, it was found that they have a greater tendency to form roughness in their structure. However, the starch content was not directly related to the crystallinity index. Allowing to identify that the inadequate management of the storage silo with air flow for drying interferes with the drying of the grains and that the lack of care prior to storage can harm the final quality of the product, since the system has technical limitations in the movement of drying air.

**Keywords:** Post-harvest. Quality. Air movement. Rectification cleaning.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Série histórica da exportação de arroz em casca pelo Brasil. ....	18
Figura 2 – Mapa da produção de arroz na safra 2018/19 no Brasil. ....	18
Figura 3 – Estrutura do grão de arroz. ....	19
Figura 4 – Classificação arroz na pós-colheita. ....	21
Figura 5 – Representação do sistema silo armazenador com fluxo de ar para secagem. ....	26
Figura 6 – Representação do silo armazenador com fluxo de ar para secagem, em (A) parte externa; (B) parte interna; (C) altura da coluna de grãos armazenados analisada no primeiro experimento; (D) base do silo, com pontos de descarregamento; e (E) localização dos pêndulos de termometria. ....	32
Figura 7 – Acompanhamento dos lotes de grãos de arroz armazenados nos silos secadores (A) Silo 2, 19U/1,5I; (B) Silo 3, 17U/2,5I; (C) Silo 4, 18U/2,0I; e (D) Silo 5, 16U/3,0I. ....	39
Figura 8 – Espectro de Difração de Raios-X dos grãos de arroz em função do teor de amido, em (A) baixo; (B) médio; (C) alto em 19U/1,5I; (D) baixo; (E) médio; (F) alto em 18U/2,0I; (G) baixo; (H) médio; (I) alto em 17U/2,5I; (J) baixo; (K) médio; e (L) alto em 16U/3,0I. ....	49
Figura 9 – Microscopia Eletrônica de Varredura dos grãos de arroz em função do teor de amido, em (A) baixo 19U/1,5I; (B) alto 19U/1,5I; (C) baixo 18U/2,0I; (D) alto 18U/2,0I; (E) baixo 17U/2,5I; (F) alto 17U/2,5I; (G) baixo 16U/3,0I; e (H) alto 16U/3,0I. ....	50
Figura 10 - Heatmap utilizando a distância euclidiana entre as condições de armazenamento dos grãos de arroz. ....	52
Figura 11 – Rede de correlações de Pearson entre as variáveis avaliadas no experimento. ....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quinze países com maior produção de arroz em casca na safra 2019.....	17
Tabela 2 – Composição centesimal média de arroz integral, branco polido e parboilizado polido. .....	20
Tabela 3 – Equações para determinação da vazão e fluxo de ar em silos. ....	30
Tabela 4 – Caracterização do complexo de armazenagem ao avaliar a qualidade dos grãos relacionando aos teores de água e impurezas, com a respectiva designação. ....	31
Tabela 5 – Velocidades, vazões e fluxos de ar nos silos armazenadores com fluxo de ar para secagem. ....	35
Tabela 6 – Valores obtidos na simulação plena do sistema silos armazenadores com fluxo de ar para secagem.....	36
Tabela 7 – Avaliação da movimentação de ar na massa de grãos armazenados em silo armazenador com fluxo de ar para secagem a partir de diferentes processos de limpeza de retificação. ....	37
Tabela 8 – Análise de variância das análises físico-químicas e classificação dos grãos arroz armazenados em silo armazenador com fluxo de ar para secagem. ....	40
Tabela 9 – Análise física dos grãos de arroz com diferentes teores de água e impurezas armazenados em silo armazenador com fluxo de ar para secagem. ....	40
Tabela 10 – Classificação física do grãos de arroz com diferentes teores de água e impurezas armazenados em silo armazenador com fluxo de ar para secagem. ....	44
Tabela 11 – Análise de proteína, gordura e amido de grãos de arroz com diferentes teores de água e impurezas armazenados em silo armazenador com fluxo de ar para secagem. ....	46
Tabela 12 – Análise de fibras e cinzas de grãos de arroz com diferentes teores de água e impurezas armazenados em silo armazenador com fluxo de ar para secagem.....	47
Tabela 13 – Cristalinidade relativa de grãos de arroz com diferentes teores amido. ....	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

#	Mesh
% (b.u)	Teor de água em base úmida
%	Percentual
$\mu\text{m}$	Micrometro
$A_a$	Área amorfa
$A_b$	Área da base do silo
$A_c$	Área cristalina
$A_e$	Área de entrada
$A_s$	Área de saída do exaustor
AS	Cinzas
ASM	Massa específica
BRO	Grãos quebrados
C/L	Relação comprimento pela largura
CEPA	Centro de Pesquisa em Alimentação
CF	Fibras
CH	Grãos gessados
cm	Centímetro
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CP	Proteína
cv	Cavalo-vapor
$d_e$	Deslocamento do ar
DIC	Delineamento inteiramente casualizado
DM	Grãos defeituosos
DRX	Difração de Raios X
EDS	Espectroscopia de Raio-X por Dispersão
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
$F$	Fluxo
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
FAT	Gordura
$F_e$	Fluxo de ar de entrada
$F_p$	Fluxo de ar no plenum
$F_s$	Fluxo de ar de saída
Furos $\text{cm}^{-2}$	Furos por centímetro quadrado
$\text{g m}^{-2}$	Grama por metro quadrado
GLP	Gás liquefeito de petróleo
ha	Hectare
I	Teor de impurezas
IC	Renda
ICDD	The International Centre for Diffraction Data
kcal	Quilocaloria
$\text{kg m}^{-3}$	Quilograma por metro cúbico
kg	Quilograma
$\text{km h}^{-1}$	Quilometro por hora
kV	Quilovolts
LAPOS	Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Agrícolas
$\text{m s}^{-1}$	Metro por segundo
m	Metro

$m^3 h^{-1}$	Metro cúbico por hora
$m^3 \text{ min}^{-1} m^{-2}$	Metro cúbico por minuto por metro quadrado
$m^3 \text{ min}^{-1} t^{-1}$	Metro cúbico por minuto por tolenada
$m^3 \text{ min}^{-1}$	Metro cúbico por minuto
$m^3 t^{-1} \text{ min}^{-1}$	Metro cúbico por tonelada por minuto
$m^3$	Metro cúbico
MDIC	Ministério da Economia, Indústria, Comércio Exterior e Serviços
ME	Massa específica
mm	Milímetro
$mm^2$	Milímetro quadrado
mmca	Milímetro de coluna de água
MPa	Mega Pascal
$N_2$	Nitrogênio
NIRS	Espectrômetro de Infravermelho Próximo
Nm	Nanômetro
NR	Norma Regulamentadora
°	Grau
°C	Graus Celsius
$P_a$	Peso de água presente no grão
Pa	Pascal
PCA	Análise de Componentes Principais
$P_{ms}$	Peso da massa seca
$Q$	Vazão
$Q_e$	Vazão de ar de entrada
$Q_p$	Vazão de ar no plenum
$Q_s$	Vazão de ar de saída
$r_b$	Raio da base do silo
$R_C$	Cristalinidade relativa
$r_e$	Raio de entrada do exaustor
rpm	Rotações por minuto
$r_s$	Raio de saída do exaustor
s	Segundo
sc	Sacas
SOSBAI	Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado
ST	Amido
$t m^{-3}$	Tonelada por metro cúbico
T	Temperatura
t	Tonelada
U	Teor de água
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UFSM-CS	Universidade Federal de Santa Maria – Campus Cachoeira do Sul
UPF	Universidade de Passo Fundo
V	Velocidade do ar
$V_e$	Velocidade do ar de entrada
$V_s$	Velocidade de saída do ar
WC	Teor de água
YD	Rendimento
t	Tempo

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	16
2.1 OBJETIVO GERAL .....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
2.3 HIPÓTESES .....	16
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
3.1 PRODUÇÃO E CONSUMO DE ARROZ .....	17
3.2 QUALIDADE DO ARROZ NA PÓS-COLHEITA .....	19
3.3 CONSERVAÇÃO DE GRÃOS DE ARROZ.....	22
3.4 SECAGEM .....	24
<b>3.4.1 Sistema silo armazenador com fluxo de ar para secagem</b> .....	26
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	29
4.1 ESTRUTURA DOS SILOS ARMAZENADORES COM FLUXO DE AR PARA SECAGEM DE ARROZ E AS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS .....	29
4.2 AVALIAÇÕES DA MOVIMENTAÇÃO DE AR NA COLUNA DE GRÃOS.....	29
4.3 AVALIAÇÕES DA MOVIMENTAÇÃO DE AR NA MASSA DE GRÃOS COM LIMPEZA DE RETIFICAÇÃO .....	30
4.4 QUALIDADE DOS GRÃOS DE ARROZ COM DIFERENTES TEORES DE ÁGUA E IMPUREZAS .....	31
4.5 BENEFICIAMENTO .....	32
4.6 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DO ARROZ EM CASCA .....	32
4.7 CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICO-QUÍMICA DO ARROZ.....	33
4.8 ANÁLISE DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX) .....	33
4.9 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	34
4.10 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	34
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	35
5.1 MOVIMENTAÇÃO DO AR NA COLUNA DE GRÃOS NOS SILOS ARMAZENADORES COM FLUXO DE AR PARA SECAGEM.....	35
5.2 MOVIMENTAÇÃO DE AR NA MASSA DE GRÃOS COM LIMPEZA DE RETIFICAÇÃO .....	36
5.3 RELAÇÃO TEORES DE ÁGUA E IMPUREZAS NA SECAGEM E QUALIDADE DOS GRÃOS DE ARROZ .....	38
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	54
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	55

## 1 INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa*) é um dos principais alimentos da população mundial, sendo composto essencialmente por amido, proteínas, lipídios e fibras. Contudo, a composição do grão está sujeita a alterações em função de diferenças de cultivares, manejos de produção, formas de processamento e armazenamento (ZHOU et al., 2002a).

Verifica-se que a variedade/cultivar e fatores de pré-colheita, como práticas culturais e condições ambientais, possui efeitos na qualidade do arroz. No entanto, além desses aspectos, a pós-colheita envolvendo processos e operações, tais como a secagem, armazenamento e beneficiamento, possui grande importância e afeta diretamente a qualidade dos grãos (ATUNGULU e SADAKA, 2019; ATUNGULU et al., 2019). As causas das alterações a cerca da qualidade podem ser variáveis e complexas, entretanto destaca-se a ação das interações entre fatores abióticos e bióticos que podem relacionar-se com características físicas ou morfológicas do arroz (DILLAHUNTY et al., 2001; KUMAR e KALITA, 2017).

Na secagem, a redução dos teores de água dos grãos para níveis seguros de armazenamento é fundamental para a preservação da qualidade, evitando o desenvolvimento de microrganismos e alterações físico-químicas (CORADI et al., 2015). A secagem do arroz em casca geralmente é realizada em secadores intermitentes e contínuos a altas temperaturas. Entretanto, surgem os sistemas silos armazenadores com fluxo de ar para secagem como uma alternativa mais viável a essas tecnologias, a qual possibilitam a realização da secagem a baixas temperaturas, com menores custos e maior qualidade aos grãos. Além disto, no silo armazenador com fluxo de ar para secagem, ao mesmo tempo que se realiza a secagem é feita a armazenagem do arroz, com auxílio de sistemas de termometria para monitoramento da qualidade e sistemas de aeração natural para evitar o aquecimento dos grãos.

No sistema silo armazenador com fluxo de ar para secagem, a massa de grãos permanece estática no silo e o ar flui entre os grãos, o que torna o processo de secagem mais lento. Para que ocorra a secagem, o ar inserido na massa de grãos deve estar em condições adequadas de temperatura e umidade relativa para que não haja equilíbrio higroscópico intergranular ao longo da camada de grãos. Desta forma, necessita-se de um maior tempo para finalizar a operação de secagem e, conseqüentemente há um risco maior de deterioração das camadas superiores de grãos pelos altos teores de água e riscos com aquecimento da massa de grãos, condensação e conseqüentemente um aumento do processo respiratório dos grãos. Por outro lado, quando utilizada-se fontes suplementares de aquecimento para desumidificar o ar de secagem para

possibilitar condições de secagem, sem o controle adequado, pode ocorrer secagem excessiva nas camadas inferiores de grãos, conforme Sampaio et al. (2007).

Outro fator que exige atenção, é a presença de impurezas na massa de grãos no silo armazenador com fluxo de ar para secagem, devido uma inadequada limpeza dos lotes de grãos recebidos na unidade armazenadora. O aumento de teores de impurezas entre os grãos possibilita um maior adensamento e causando pressões estáticas diferentes entre pontos e camadas de grãos, interferindo na movimentação e desuniformidade de distribuição do ar intergranular, insuflado pelos exaustores de secagem, podendo provocar secagem excessivas em alguns pontos e em outros a não secagem dos grãos, a migração de umidade, o aquecimento dos grãos, a condensação e a contaminação dos grãos (CHENG et al., 2015).

As condições de armazenamento a partir dos fatores citados, pode alterar a atividade metabólica dos grãos, gerando diferentes reações bioquímicas que podem prejudicar quantitativamente e qualitativamente os componentes dos grãos (CORADI et al., 2014; CORADI et al., 2015). Desta maneira, para que o processo de secagem e armazenagem ocorra de maneira satisfatória no silo armazenador com fluxo de ar para secagem, torna-se importante avaliar, principalmente, a relação teores de água e impurezas com a movimentação do ar intergranular e a sua eficiência de secagem, com a qualidade dos grãos.

Portanto, o trabalho tem como expectativa contribuir com resultados relacionados ao desempenho do silo armazenador com fluxo de ar para secagem, ao analisar a movimentação de ar na massa de grãos e qualidade físico-química de grãos arroz armazenados com diferentes teores de água e impurezas, visando futuras adequações, se necessário, ao sistema para garantia da qualidade final do produto.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho da movimentação do ar de secagem na massa de grãos de arroz armazenados em silos armazenadores com fluxo de ar para secagem em função da variação dos teores de água e impurezas e os efeitos na qualidade.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

I. Avaliar na simulação o desempenho pleno da movimentação do ar de secagem na massa de grãos de arroz armazenados em silos armazenadores com fluxo de ar para secagem.

II. Avaliar o processo de repeneiramento da massa de grãos no desempenho na movimentação do ar de secagem nos grãos de arroz armazenados em silos armazenadores com fluxo de ar para secagem e a qualidade.

III. Avaliar a influência de teores de água e impurezas na massa de grãos de arroz sobre o desempenho do processo de secagem em silo armazenador com fluxo de ar para secagem e a qualidade dos grãos.

### 2.3 HIPÓTESES

I. A vazão de ar tende a diminuir em virtude da pressão estática, durante o carregamento dos silos. Pois, ao utilizar a mesma potência nos ventiladores a eficiência tende a diminuir.

II. A altura da camada de grãos influencia diretamente na secagem do grão, se mal dimensionado o silo armazenador com fluxo de ar para secagem ocorrerá a falta de movimentação do ar nas camadas superiores, resultando numa secagem ineficaz.

III. O repeneiramento reduz a quantidade de impurezas da carga de grãos, atuando positivamente na homogeneidade da secagem, por diminuir as possibilidades de correntes de ar em pontos específicos.

IV. A relação do teor de água e impurezas influencia na qualidade. Pois, o teor de água durante a colheita deve encontrar-se entre 18 e 23%, já que interfere na qualidade dos grãos, bem como o teor elevado de impurezas dificulta a movimentação de ar no interior do equipamento.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 PRODUÇÃO E CONSUMO DE ARROZ

O arroz (*Oryza sativa* L.) é o alimento básico de mais da metade da população mundial, (CONAB, 2015). Sendo considerado como o alimento mais importante para a segurança alimentar do mundo segundo a FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Além de ser uma cultura bastante rústica, e com ótimas propriedades nutricionais, o que a faz também ser considerada a espécie de maior potencial de aumento na produção para combate a fome no mundo (GOMES e MAGALHÃES JUNIOR, 2004).

Com exceção da Antártida o arroz é produzido em todos os continentes, concentrando a maior produção na Ásia, conforme a Tabela 1. Na América Latina, o Brasil se destaca como o maior produtor, encontrando-se na 12<sup>a</sup> posição mundial, (FAO, 2020).

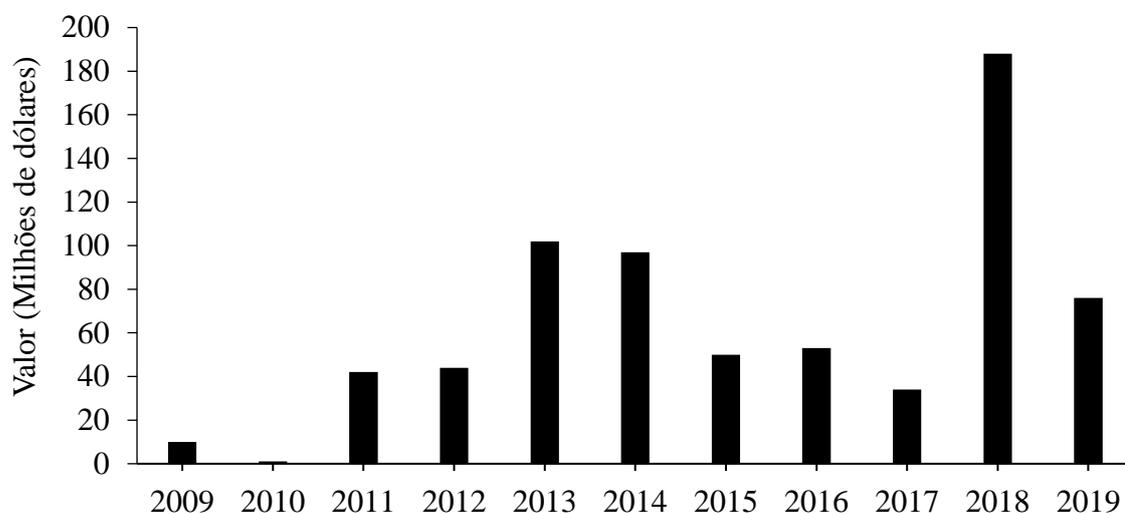
Tabela 1 – Quinze países com maior produção de arroz em casca na safra 2019.

Posição	País	Produção (t)
1	China	209.614.000
2	Índia	177.645.000
3	Indonésia	54.604.033
4	Bangladesh	54.586.344
5	Vietnã	43.448.504
6	Tailândia	28.356.869
7	Mianmar	26.269.814
8	Filipinas	18.814.827
9	Paquistão	11.115.428
10	Camboja	10.886.000
11	Japão	10.527.000
12	Brazil	10.368.611
13	Nigéria	8.435.000
14	Estados Unidos	8.376.720
15	Egito	6.690.000

Fonte: FAO (2020).

Conforme o Ministério da Economia, Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC), em 2019 o Brasil exportou 1,434 milhões de toneladas, aproximadamente 13,5% da sua produção média no ano, contudo teve uma redução no saldo de exportações em 2019. Desta forma, percebe-se que há uma grande oscilação nas exportações de arroz (Figura 1), principalmente em decorrência da variação do dólar.

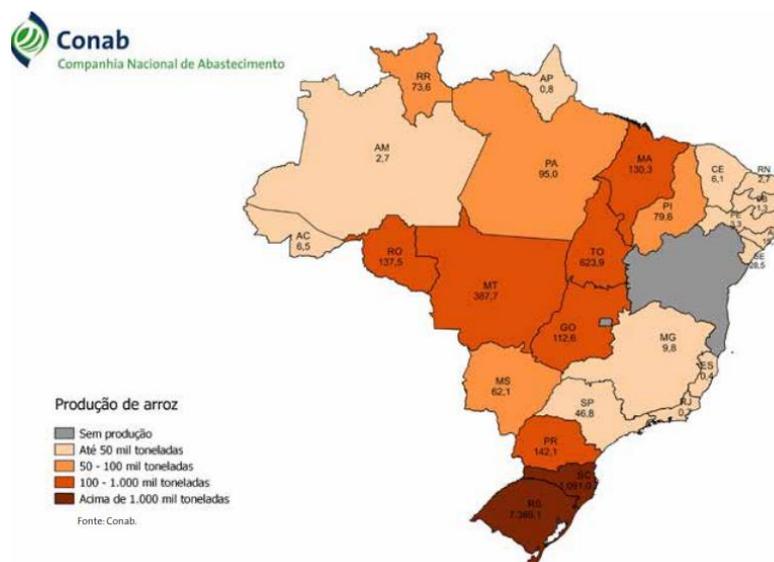
Figura 1 – Série histórica da exportação de arroz em casca pelo Brasil.



Fonte: Adaptado de MDIC (2020).

Conforme a Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2019), o estado com maior contribuição na produção nacional do arroz é o Rio Grande do Sul, finalizando a safra 2018/19 com uma produção de 7.389,1 mil toneladas, em segundo e terceiro lugar, Santa Catarina e Tocantins, respectivamente, como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Mapa da produção de arroz na safra 2018/19 no Brasil.



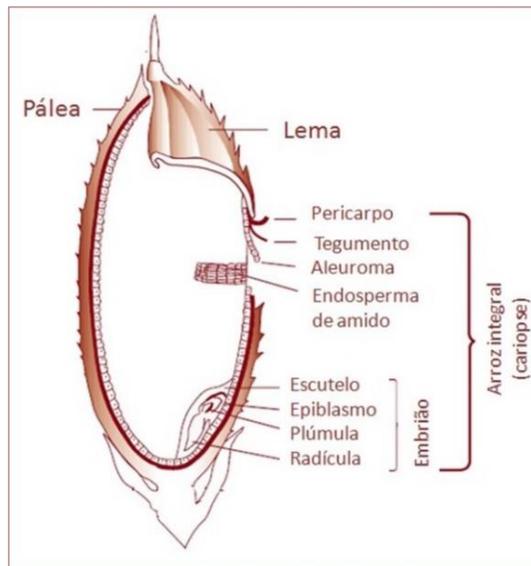
Fonte: CONAB (2019).

O grande volume produzido nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina é considerado estabilizador para o mercado brasileiro de arroz e garante o seu suprimento à população brasileira. Quase todo o arroz produzido nestes dois estados apresenta grãos da classe longo-fino e com alta qualidade de cocção, características exigidas pelo mercado brasileiro, principalmente nas Regiões Sul e Sudeste (SOSBAI, 2014).

### 3.2 QUALIDADE DO ARROZ NA PÓS-COLHEITA

O grão de arroz (Figura 3) é composto por: (i) casca, constituída pela pálea e a lema, correspondendo a 20% do peso do grão; (ii) cariopse, constituída pelo pericarpo, tegumento, aleuroma, endosperma de amido; (iii) embrião, que é composto pelo escutelo, epiblasmo, plúmula e radícula (WALTER et al., 2008; YU et al., 2014).

Figura 3 – Estrutura do grão de arroz.



Fonte: MCLEAN et al. (2002).

Conforme Juliano e Bechtel (1985), através da descascamento, separa-se a casca da cariopse, obtendo-se o arroz integral. Este pode ser polido para remoção do farelo (pericarpo, tegumento, camada de aleurona e gérmen), que representa 8,5-14,8% do arroz integral, obtendo-se o arroz branco polido. Os grãos também podem ser submetidos à parboilização, processo hidrotérmico através do qual se obtém o arroz parboilizado, o qual pode ser consumido na forma integral ou polido.

O arroz é constituído principalmente por amido, apresentando quantidades menores de proteínas, lipídios, fibras e cinzas (Tabela 2). Entretanto, a composição do grão e de suas frações estão sujeitas a diferenças decorrentes das diferentes variedades, variações ambientais, de manejo, de processamento e de armazenamento, produzindo grãos com características nutricionais diferenciadas, (ZHOU et al., 2002b; BALINDONG et al., 2018). Além disso, os nutrientes não estão uniformemente distribuídos nas diferentes frações do grão. As camadas externas apresentam maiores concentrações de proteínas, lipídios, fibra, minerais e vitaminas, enquanto o centro é rico em amido. Dessa forma, o polimento resulta em redução no teor de nutrientes, exceto de amido, originando as diferenças na composição entre o arroz integral e o polido (STORCK et al., 2005).

Tabela 2 – Composição centesimal média de arroz integral, branco polido e parboilizado polido.

<b>Constituinte</b>	<b>Arroz integral</b>	<b>Arroz branco polido</b>	<b>Arroz parboilizado polido</b>
Amido total	74,12	87,58	85,08
Proteínas (N x5,95)	10,46	8,94	9,44
Lipídios	2,52	0,36	0,69
Cinzas	1,15	0,30	0,67
Fibra total	11,76	2,87	4,15
Fibra insolúvel	8,93	1,05	1,63
Fibra solúvel	2,82	1,82	2,52

Fonte: Adaptado de Storck et al. (2005).

O arroz possui dois tipos de amido, a amilose e a amilopectina. O teor de amilose está correlacionado com as propriedades texturais, como maciez, coesão, cor, brilho e com volume de absorção de água e expansão. Relaciona-se, portanto, com as modificações que ocorrem durante o processo de cocção e determinam a qualidade culinária do arroz (MATSUO et al., 2018).

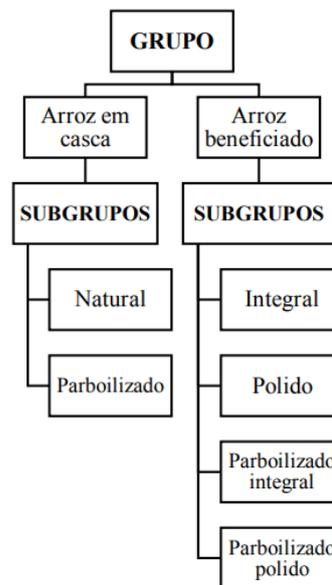
O conteúdo médio de proteínas do arroz integral situa-se na faixa de 8,0 a 9,0%, havendo redução neste teor na medida em que as camadas superficiais vão sendo retiradas no processo de polimento, uma vez que o teor de proteína diminui progressivamente da periferia para o interior da cariopse (KOLPAKOVA et al., 2019).

As informações a respeito das características físicas dos produtos agrícolas são atributos utilizados para determinar as condições de secagem e armazenagem, possibilitando o prognóstico de perdas de qualidade do material até o momento de sua comercialização (RESENDE et al., 2008).

Devido a sua importância, o potencial de rendimento de grãos do arroz era o foco principal das pesquisas no passado, porém pouca atenção foi dada à qualidade dos grãos (CHENG et al., 2014). A qualidade engloba inúmeros atributos, que influenciam os critérios de satisfação dos consumidores, que incluem aparência, polimento, cozimento e qualidades nutricionais (BAO, 2014).

O arroz é identificado pela própria espécie, considerando seus requisitos de qualidade de amostragem, pelo tratamento pós-colheita ao qual é submetido, sendo classificado em grupos e subgrupos (Figura 4), conforme Instrução Normativa nº 6/2009 (BRASIL, 2009), do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

Figura 4 – Classificação arroz na pós-colheita.



Fonte: Adaptado de Faria et al. (2012).

Os defeitos adquiridos durante os diversos estádios fenológicos de desenvolvimento e crescimento vegetativo, durante a colheita, o transporte e as operações de pré-armazenamento, especialmente a secagem, além de não serem eliminados durante o armazenamento, mostram forte tendência a sofrerem incrementos, gerando um grande impacto sobre a qualidade do grão (PESKE et al., 2003; MUTUNGI et al., 2019).

As perdas quantitativas, durante o armazenamento, são as mais facilmente observadas e refletem o metabolismo dos grãos, microrganismos associados, pragas e outros animais, resultando em perda de matéria seca. Já as perdas qualitativas estão relacionadas as reações

químicas enzimáticas e às não enzimáticas, resultando em perdas do valor nutricional e comercial (ELIAS et al., 2000; CORADI et al., 2014).

A conservação dos grãos por longos períodos, após colhidos e secos de maneira adequada, somente será possível se os equipamentos de aeração e termometria forem apropriados e as técnicas de operação forem aplicadas corretamente (BINELO et al., 2019).

### 3.3 CONSERVAÇÃO DE GRÃOS DE ARROZ

Em um silo, além dos grãos, estão presentes diversos seres vivos, como pássaros, roedores, insetos, fungos e bactérias, os chamados fatores bióticos de deterioração. Estes sofrem influência dos fatores abióticos: temperatura, umidade, pressão, circulação do ar, condição física dos grãos entre outros. Ocorrendo um conjunto de fatores e interação, chamando-se de ecossistema de armazenamento (JIAN e JAYAS, 2012)

A falta de uma secagem prévia e eficiente, além do risco de desenvolvimento de insetos, ácaros e microrganismos, possibilita o estímulo do metabolismo dos próprios grãos, consumindo substâncias de reservas, provocando deteriorações e reduzindo sua qualidade (ELIAS, 2008).

No armazenamento de grãos o conhecimento do equilíbrio higroscópico torna-se essencial, visto que os grãos devem ser armazenados em condições adequadas de umidade. Essas condições podem mudar, perdendo ou recebendo umidade durante o período de armazenamento, causando prejuízos ao produto e à sua comercialização. O equilíbrio higroscópico pode ser calculado conforme a equação modificada de Henderson (Equação 1) (MILMAN, 2002).

$$1 - UR = e^{[-K(T+C)(U_e)N]} \quad (1)$$

onde,

*UR*: Umidade Relativa do ar (decimal)

*T*: Temperatura do ar (°C)

*U<sub>e</sub>*: Umidade de equilíbrio do grão (% b.s)

*K, C, N*: constantes que dependem do grão (valores tabelados).

Durante o período de armazenagem dos grãos, em que os produtos devem apresentar o teor de água ideal e uniforme, o que depende do produto, para arroz aproximadamente 13%, é primordial o controle das condições do ar presente no espaço intergranular. Pois, o aumento da taxa de respiração dos grãos, a presença de fungos e ou insetos, a migração de umidade e a

desuniformidade do teor de água do produto podem alterar o equilíbrio higroscópico dos grãos (IGATHINATHANE et al., 2008).

Assim, todos esses fatos podem levar a perda de matéria e o estabelecimento de condições ideais à proliferação de pragas, como insetos e fungos que podem metabolizar micotoxinas, conseqüentemente afetando a qualidade do grão (OLIVEIRA et al., 2007; TANG et al., 2019).

A temperatura é um dos principais fatores que interferem na qualidade de armazenamento de grãos (FARONI et al., 2005; WANG et al., 2010). Os focos de aquecimento externo, temperatura do ar (clima) e a incidência de radiação solar, influenciam na temperatura dos grãos, principalmente em silos metálicos. Além disso, o incremento de temperatura no interior dos silos pode ocorrer em função de problemas com a umidade, fungos e calor, conforme Jian e Jayas (2012).

Para o correto monitoramento de temperatura no silo, e também para avaliar a gravidade das alterações de temperatura, é necessário o uso de termometria. O acompanhamento diário da temperatura de armazenamento possibilita acionar a ventilação de resfriamento dos grãos (aeração) de forma preventiva (SHAFIEKHANI et al., 2018).

A aeração pode ter diferentes efeitos sobre a massa de grãos, variando conforme as condições do ambiente e produto. A utilização da técnica pode ter o objetivo de resfriamento da massa de grãos, prevenção do aquecimento e umedecimento, remoção de odores, entre outros (RENIANA et al., 2017).

No caso de aeração secante ou em silo armazenador com fluxo de ar para secagem com uso de ar aquecido o projeto deve prever um superdimensionamento da aeração, do qual o fluxo de ar também deve ser maior do que o utilizado na aeração para conservação de grãos armazenados secos, já que é um processo lento (ELIAS et al., 2009).

Além disso, um dos obstáculos para a realização da aeração é a compactação dos grãos, pois prejudica a passagem de ar e pode impedir que se atingisse o resultado desejado. Bem como, a compactação, impurezas e grãos danificados também têm efeito negativo na aeração. Para contornar estes problemas, podem ser utilizados ventiladores auxiliares ou utilizar outros, como a intra e a transilagem, conforme Rocha (2020).

Segundo Olatunde et al. (2016) as condições dos grãos podem tornar o processo de aeração menos eficaz, impedindo o fluxo uniforme de ar ao longo de todo o silo, uma vez que, a presença de poeiras finos e/ou impurezas na massa do grãos, bem como também as propriedades físicas do grão dificulta a exposição à aeração nos pontos com acúmulo de resíduos e já outras áreas podem estar sujeitas a alta exposição e assim secar em excesso.

Como consequência, a falta de aeração está associada a problemas de umidade dos grãos, crescimento de fungos, ataque de insetos e deterioração (BARTOSIK e MAIER, 2006; KHATCHATOURIAN e BINELO, 2008). Desta forma, é necessário entender a distribuição e o padrão do fluxo de ar em diferentes condições do leito para uma aeração bem sucedida, a fim de evitar a deterioração da qualidade do arroz, contaminação por micotoxinas e consequentemente reduzir as perdas econômicas, como ressaltado por Olatunde et al. (2016).

### 3.4 SECAGEM

Os grãos iniciam sua secagem ainda nas plantas, assim que alcançam sua maturidade fisiológica, ocorrendo a secagem natural, proporcionada, principalmente, pela ação dos ventos e da radiação solar, porém este é um processo lento e passível de interrupção. Sendo assim, torna-se necessário a colheita dos grãos ainda com elevado teor de água e consequentemente a realização da secagem artificial, que pode ser realizada através de ar aquecido ou natural (EIRAS e BIAGIONNI, 2014).

A secagem é considerada uma das etapas mais importante no beneficiamento de grãos, a qual tem por objetivo a redução do teor de água a níveis que permitam a preservação segura do produto e sua estabilidade (PUZZI, 1986; MENEZES, 2012; MENEGHETTI et al., 2012). Para que ocorra a secagem é necessário que a pressão de vapor d'água dos grãos seja maior que a pressão de vapor d'água do ar de secagem. Caso a pressão de vapor d'água dos grãos seja menor, ocorrerá o umedecimento do produto e, caso as pressões sejam iguais, ocorrerá o equilíbrio higroscópico, ou seja, o produto alcança o equilíbrio com o ambiente em que será armazenado (HAMPEL et al., 2019).

Para evitar a deterioração do grão o nível de atividade de água deve ser reduzido, permitindo seu armazenamento seguro, consequentemente diminuindo a atividade metabólica dos grãos e inibindo o crescimento de microrganismo. Isto corresponde a um grau de teor de água inferior a 14%, que é considerado adequado para a armazenagem e posterior beneficiamento (WISSET et al., 2001; ELIAS, 2007; CORADI et al., 2016).

Lang et al. (2020) estudaram a influência do atraso da secagem em 3 e 6 dias nas condições de temperatura de 15 e 25°C em grãos de arroz vermelho. Do qual, observaram que os grãos que aguardaram a secagem por maior tempo e em condições de temperatura acima de 25°C sofreram maiores degradações dos compostos fenólicos e redução da solubilidade proteica. Além disso, foram observadas mudanças nas propriedades de cozimento e digestibilidade dos grãos durante o intervalo de tempo de secagem atrasado, resultando no

aumento do tempo de cozimento e dureza dos grãos cozidos (LANG et al., 2020). De acordo com Portella e Eichelberger (2001), o principal dano causado pelo retardo da secagem é o desenvolvimento de fungos, sendo os principais dos gêneros *Fusarium*, *Aspergillus* e *Penicillium*.

Entretanto, antes da secagem, é de extrema importância que os grãos sejam submetidos ao processo de pré-limpeza, que têm a finalidade de reduzir o teor final de impurezas da massa de grãos, facilitando a movimentação do ar e dos grãos, permitindo a uniformização da secagem e redução dos custos (SHEPELEV et al., 2018).

O processo de secagem consiste na transferência simultânea de calor e de massa. O ar, ao mesmo tempo em que fornece calor ao sistema, absorve água do produto em forma de vapor. O gasto de energia provocado pela evaporação da água é acompanhado por um resfriamento do ar. Contudo, o ar absorve em forma de vapor o que perdeu sob a forma de calor, caracterizando-se como um processo adiabático (ELIAS, 2007). Entretanto, o aquecimento do ar de secagem deve ocorrer dentro de limites determinados, em virtude dos danos físico-químicos e biológicos que podem causar aos grãos (MILMAN, 2002).

A secagem artificial é realizada a partir de estruturas específicas construídas para esse fim, onde o ar é forçado a passar pela massa de grãos. Para o arroz, há diferentes métodos que combinam temperatura e fluxo de ar, tempos e formas de movimentação dos grãos e de contato ar/grão, como a secagem estacionária, intermitente, contínua e seca-aeração (EMBRAPA, 2005; MENEGHETTI et al., 2012).

Conforme Golmohammadi et al. (2016), o método de secagem intermitente é o mais recomendado e amplamente utilizado para a secagem do arroz em casca. Contudo, deve-se evitar a remoção brusca da água através do uso de altas temperaturas, que excedam 110°C, a fim de evitar danos térmicos e mecânicos. No secador intermitente passagem do ar aquecido pela massa de grãos em movimento ocorre de maneira descontínua. Assim, a difusão da água do centro para a periferia do grão e a evaporação da água superficial ocorrem de maneira mais equilibrada e branda (FAGUNDES et al., 2005; PARK et al., 2012).

A secagem estacionária consiste na remoção de água do grão pelo mecanismo de vaporização térmica. Fundamentando-se pelo contínuo insuflamento de ar, através de um volume de grãos que permanece estático (EICHOL e PERES, 2008; GUIMARÃES et al., 2015).

Neste contexto, observa-se que a secagem do arroz em casca é, geralmente, realizada em secadores intermitentes e, em menor escala, em secadores contínuos. Entretanto, ambos sistemas apresentam a necessidade de instalações com grande capacidade de secagem, o que

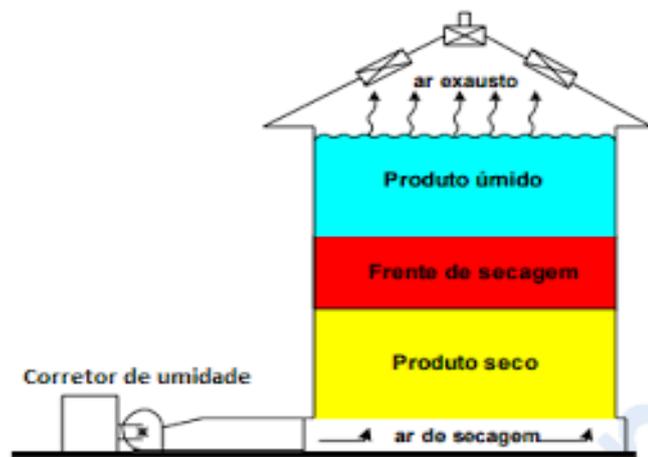
gera um alto custo. Uma alternativa de menor custo é a secagem em silos metálicos conforme Ruiz e Ness (2001).

### 3.4.1 Sistema silo armazenador com fluxo de ar para secagem

O silo armazenador com fluxo de ar para secagem apresenta algumas características específicas que não são exigidas para os silos empregados apenas para a armazenagem, como com relação ao piso que deve ser de chapas metálicas perfuradas para promover a distribuição uniforme do ar e o ventilador que deve fornecer quantidade de ar suficiente para realizar a secagem de toda a massa de grãos. Desta maneira, a dimensão do silo, diâmetro e altura, e o produto a ser armazenado são os fatores que determinam a potência do ventilador a ser usado (SILVA et al., 2008; HAQ et al., 2016).

Estruturalmente, os silos armazenadores com fluxo de ar para secagem (Figura 5) possuem um fluxo de ar entre  $1,5$  e  $4 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ , além disso devem apresentar área de suspiros equivalente a  $1 \text{ m}^2$  para cada  $300 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$  de ar insuflado, do qual o processo carregamento do silo pode ocorrer em etapas ou em uma única vez (SILVA, 2005; SOSBAI 2018).

Figura 5 – Representação do sistema silo armazenador com fluxo de ar para secagem.



Fonte: Silva (2005).

Devido ao baixo fluxo de ar na massa de grão, o processo de secagem torna-se lento e as baixas temperaturas do ar diminuem a capacidade de evaporação de água do produto, além disso, o processo é dificultado em regiões com alta umidade relativa. Uma alternativa para solucionar esse problema é a utilização de fonte suplementar de aquecimento (resistência

elétrica, fornalha, energia solar, entre outras), no entanto, pode provocar uma supersecagem, principalmente nas camadas inferiores do silo (SILVA et al., 2008; KUMORO et al., 2019).

Coradi et al. (2020), observaram que com o aumento da altura da massa de grãos de arroz, a secagem nas camadas superiores permanece incompleta, apresentando baixa eficiência de secagem e manutenção da qualidade dos grãos de arroz deficiente. Porém, a realização de peneiramento da massa de grãos contribui para a redução de impurezas e melhora a distribuição da pressão estática, beneficiando a movimentação do ar de secagem, que torna-se mais homogênea. Assim, para garantir a eficiência operacional e a qualidade de grãos armazenados e secos em um silo armazenador com fluxo de ar para secagem o projeto necessita atender fatores como a altura da coluna de grãos, vazão e fluxo de ar, temperatura e umidade relativa do ar de secagem e armazenamento, temperatura da massa de grãos e o tipo de processamento.

Desta forma, durante o processo de secagem dos grãos, deve haver um grande rigor no controle da uniformidade da taxa de secagem e da temperatura para evitar os choques térmicos que provocam o aumento da incidência de grãos quebrados, predispondo-os à ocorrência de danos metabólicos durante o armazenamento, resultando no aumento dos defeitos e redução da conservabilidade. Consequentemente a espessura de camada grãos no silo armazenador com fluxo de ar para secagem exerce influência no processo, sendo que quanto mais espessa for a camada de produto para a secagem, menor deve ser a temperatura do ar, conforme as indicações da SOSBAI (2018).

Ao observar os estudos de Coradi (2018) com um protótipo de silo-secador experimental, é possível observar que a eficiência energética e desempenho demonstram-se positivos com relação a dinâmica de distribuição de ar em seu interior. Além disso, durante a secagem a distribuição do ar aquecido apresentou-se uniforme, mostrando-se eficiente na secagem e preservando a qualidade dos grãos de soja. Porém, para o armazenamento observou-se que as temperaturas mais elevadas empregadas na secagem apresentaram aumento considerável nos valores de condutividade elétrica e diminuição significativa da massa específica aparente, consequentemente houve a deterioração dos grãos, que é elevada no decorrer do período de armazenamento.

Montanuci et al. (2016), observou em seu estudo um teor de água menor na parte inferior do silo-secador em relação à parte superior, apresentando uma desuniformidade, como citado por em sua pesquisa com milho, além disso a difusividade da massa foi maior na parte inferior devido à maior manutenção da temperatura nesta parte do equipamento. De acordo com Prasad et al. (2010), o aumento da temperatura modifica a taxa de difusão e altera o comportamento de absorção. Embora temperaturas elevadas levem a maiores taxas de secagem, elas podem

prejudicar a integridade da estrutura do grão, promover a gelatinização do amido e afetar o comportamento do peso do grão.

Com relação ao tempo de armazenamento, Dionello et al. (2000), verificou que a secagem com ar natural em silos-secadores, apesar de lenta, apresenta viabilidade de uso para conservação de grãos de milho por seis meses, porém em temperaturas não superiores a 20°C. E, quando utilizado fonte suplementar de aquecimento, com temperatura de 60°C ou mais ocorre uma redução da conservabilidade dos grãos em armazenamento, por período de aproximadamente de três meses.

Na pesquisa Hoeltz et al. (2009), foi observado que o sistema silo-secador tem sua eficiência prejudicada ao avaliar a atividade fúngica, já que a presença destes microrganismos pode levar à rápida deterioração na qualidade nutricional dos grãos e à contaminação com micotoxinas. Pois o teor de água dos grãos influencia diretamente no desenvolvimento de fungos, principalmente no terço superior do silo, enquanto que no terço inferior a temperatura interna do silo armazenador com fluxo de ar para secagem reduz o desenvolvimento. Neste mesmo estudo, observou-se que durante a secagem e o armazenamento, espécies de gênero *Penicillium* (66%) foram mais abundantes, seguidas por espécies de *Aspergillus* (34%). Embora tenha sido verificada a presença de linhagens de *A. flavus* aflatoxigênicas (7,3%), não foram detectadas aflatoxinas ou outras micotoxinas nas amostras analisadas.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 ESTRUTURA DOS SILOS ARMAZENADORES COM FLUXO DE AR PARA SECAGEM DE ARROZ E AS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

O experimento foi realizado em um complexo de armazenagem em escala real, composto por cinco silos armazenadores com fluxo de ar para secagem metálicos de fundos planos perfurado, com sistema de aeração natural e desumidificação do ar ambiente complementar com aquecimento sensível do ar usando gás liquefeito de petróleo. Os silos armazenadores com fluxo de ar para secagem (marca Pagé, modelo SFP-18314) foram projetados para comportarem uma capacidade aproximada de 40.000 sacas de arroz cada, com altura cilíndrica correspondente à 12,80 metros, altura total de 18,08 metros e diâmetro de 18,30 metros (Figuras 6A).

A aeração de ar forçado foi projetada com dois ventiladores centrífugos (modelo ILS-800), acoplados a motor de 40,0 cv e rotação de 1.775 rpm, com vazão aproximada de 30.000 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, pressão estática de 284 mmca e fluxo de ar de 0,38 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> ton<sup>-1</sup> (Figuras 6B e 6D). O sistema de aeração possuía controle de temperatura e umidade relativa do ar insuflado, utilizando de uma central meteorológica, interligando os motores dos exaustores e o sistema de acionamento do gás para aquecimento complementar do ar de secagem, quando necessário, em função das condições do ar natural. O sistema de aquecimento somente foi utilizado quando a umidade relativa do ar estivesse acima de 60%, desumidificando o ar até 50%. A fim de evitar o consumo excessivo de gás, não era utilizado a aeração com aquecimento quando a umidade relativa do ar encontrava-se acima de 80%.

O estudo junto ao acompanhamento da safra 2018/19, teve início com as observações e coleta de dados em Março de 2019, concluindo o trabalho a campo no final de Agosto do mesmo ano. Assim, a pesquisa definiu três experimentos relacionados ao silo armazenador com fluxo de ar para secagem, apresentado na sequência.

### 4.2 AVALIAÇÕES DA MOVIMENTAÇÃO DE AR NA COLUNA DE GRÃOS

Avaliou-se a movimentação de ar na coluna de grãos de arroz em casca nos cinco silos armazenadores com fluxo de ar para secagem, com diferentes alturas de coluna de grãos. O Silo 1 foi preenchido com 19.858 sacas e 6,30 m de altura de coluna de grãos, o Silo 2 com 24.908 sacas e 7,90 m de altura, o Silo 3 com 28.660 sacas e 9,10 m de altura, o Silo 4 com 37.019

sacas e 11,70 m de altura, e o Silo 5 com 17.310 sacas e 5,50 m de altura (Fig 6C). Mediu-se a velocidade do ar na massa de grãos nivelada nos silos com auxílio de um termoanemômetro de pás após um mês do início do processo de secagem e armazenagem, para calcular as vazões e os fluxos de ar utilizando as equações da Tabela 3. Bem como, com as informações obtidas realizou-se simulação da movimentação de ar conforme o carregamento progressivo do silo.

Tabela 3 – Equações para determinação da vazão e fluxo de ar em silos.

Variável analisada	Equação	Unidade de medida
Área de entrada ( $A_e$ )	$A_e = \pi \times r_e^2$	$m^2$
Velocidade do ar de entrada ( $V_e$ )	$V_e = d_e \times t$	$m \text{ s}^{-1}$
Vazão de ar de entrada ( $Q_e$ )	$Q_e = V_e \times A_e \times 3600$	$m^3 \text{ h}^{-1}$
Fluxo de ar de entrada ( $F_e$ )	$F_e = \frac{Q_e/60}{A_e}$	$m^3 \text{ min}^{-1} m^{-2}$
Área de saída do exaustor ( $A_s$ )	$A_s = \pi \times r_s^2$	$m^2$
Velocidade de saída do ar ( $V_s$ )	$V_s = d_e \times t$	$m \text{ s}^{-1}$
Vazão de ar de saída ( $Q_s$ )	$Q_s = V_s \times A_s \times 3600$	$m^3 \text{ h}^{-1}$
Fluxo de ar de saída ( $F_s$ )	$F_s = \frac{Q_s/60}{A_s}$	$m^3 \text{ min}^{-1} m^{-2}$
Área da base do silo ( $A_b$ )	$A_b = \pi \times r_b^2$	$m^2$
Vazões de ar no plenum ( $Q_p$ )	$Q_p = A_b \times F_p \times 60$	$m^3 \text{ h}^{-1}$
Fluxo de ar no plenum ( $F_p$ )	$F_p = \frac{Q_p}{t_i \times A_b}$	$m^3 \text{ min}^{-1} m^{-2}$

$r_e$ : raio de entrada do exaustor (m),  $d_e$ : deslocamento do ar (m),  $t$ : tempo (s),  $r_s$ : raio de saída do exaustor (m),  $r_b$ : raio da base do silo (m),  $t_i$ : tempo (min).

#### 4.3 AVALIAÇÕES DA MOVIMENTAÇÃO DE AR NA MASSA DE GRÃOS COM LIMPEZA DE RETIFICAÇÃO

Neste experimento, após cinco meses do início do processo de secagem e armazenagem, foram avaliadas a movimentação de ar na massa de grãos de arroz com diferentes operações de limpeza de retificação nos silos armazenadores com fluxo de ar para secagem: Silo 1 vazio, Silo 2 com grãos com limpeza de retificação, Silo 3 com grãos em processo limpeza de retificação, Silo 4 com grãos sem limpeza de retificação, Silo 5 com grãos parcialmente com limpeza de retificação (Figuras 6D e 6E). Mediram-se as velocidades do ar, a temperatura e umidade relativas do ar com auxílio de um termoanemômetro de pás, enquanto que, as vazões e os fluxos

de ar foram calculadas pelas equações da Tabela 3, em diferentes pontos do sistema: na entrada do exaustor, na saída do exaustor (com aquecimento e sem aquecimento a gás), acima da coluna de grãos nivelada, próximo aos cabos de termometria (seis pontos de observação).

#### 4.4 QUALIDADE DOS GRÃOS DE ARROZ COM DIFERENTES TEORES DE ÁGUA E IMPUREZAS

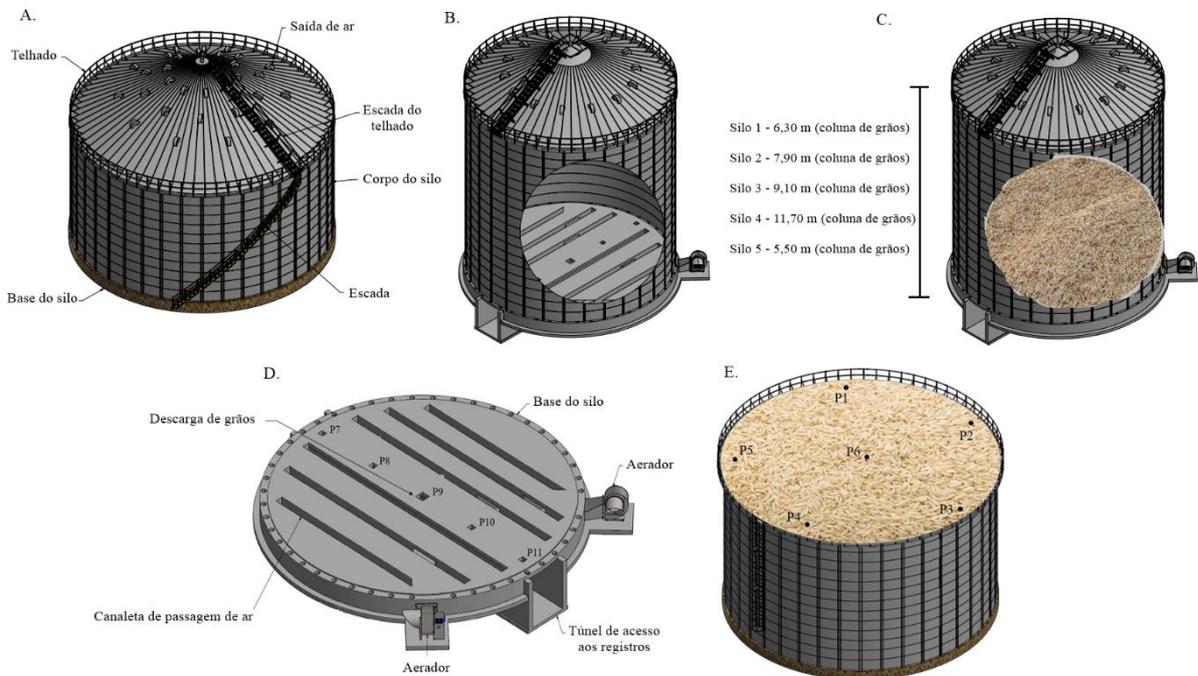
O experimento constitui-se de um delineamento experimental, com fatorial (4x11), sendo quatro silos armazenadores com fluxo de ar para secagem com lotes de grãos com diferentes teores de água e impurezas), visto que o Silo 1 encontrava-se vazio, e onze diferentes pontos de amostragem no silo armazenador com fluxo de ar para secagem, cujo seis pontos foram localizados na parte superior do silo, próximos aos pêndulos de termometria (Figuras 6D e 6E), sendo o ponto 6 localizado na parte central do silo. Os demais cinco pontos (7, 8, 9, 10 e 11) foram localizados na parte inferior dos silos armazenadores com fluxo de ar para secagem, próximos aos pontos de descargas, distribuídos uniformemente na base do silo, a fim de verificar a qualidade do arroz armazenado no silo armazenador com fluxo de ar para secagem, após os cinco meses de secagem e armazenamento.

A partir da relação teor de água/impurezas, realizou-se a amostragem de 300 g de arroz com casca, em cada posição, ao final do tempo de secagem para avaliação da qualidade dos grãos. Sendo o teor de água e de impurezas obtidos por média simples das amostras coletadas logo após a colheita, conforme os dados da Tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização do complexo de armazenagem ao avaliar a qualidade dos grãos relacionando aos teores de água e impurezas, com a respectiva designação.

<b>Silo</b>	<b>Início do período de colheita</b>	<b>Término do período de colheita</b>	<b>Total armazenado (sc de 50 kg)</b>	<b>Teor médio de água (%)</b>	<b>Teor médio de impurezas (%)</b>	<b>Designação</b>
Silo 1	-	-	-	-	-	-
Silo 2	02/04/2019	11/04/2019	42.218,60	19,2	1,6	19U/1,5I
Silo 3	12/04/2019	18/04/2019	28.660,20	17,2	2,3	17U/2,5I
Silo 4	18/04/2019	30/04/2019	36.871,40	17,8	1,9	18U/2,0I
Silo 5	13/03/2019	29/03/2019	46.212,20	15,7	3,2	16U/3,0I

Figura 6 – Representação do silo armazenador com fluxo de ar para secagem, em (A) parte externa; (B) parte interna; (C) altura da coluna de grãos armazenados analisada no primeiro experimento; (D) base do silo, com pontos de descarregamento; e (E) localização dos pêndulos de termometria.



Fonte: Autor.

#### 4.5 BENEFICIAMENTO

O beneficiamento dos grãos foi realizado em provador de arroz (Zaccaria, Paz-1 / DTA, Limeira, Brasil), que foi regulado de acordo com as recomendações técnicas para beneficiamento de arroz e do fabricante do equipamento (BRASIL, 2009). Os grãos com casca pesando 100 g foram colocados gradativamente na moega “cone” de entrada de alimentação do equipamento para a obtenção do arroz polido. O polimento foi realizado pelas pedras de polimento. As amostras foram separadas, identificadas e armazenadas em embalagens de polietileno. Após o beneficiamento, as amostras foram submetidas à análise de qualidade.

#### 4.6 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DO ARROZ EM CASCA

As amostras de arroz coletadas foram submetidas a determinação do teor de água (% b.u.) (WC) e massa específica aparente ( $\text{kg m}^{-3}$ ) (ASM) (BRASIL, 2009). Para classificação

dos grãos inteiros, foi utilizado um cilindro separador alveolar de 5,5 mm (Zaccaria, Paz-1 / DTA, Limeira, Brasil). O cilindro separador rotativo possui função gravitacional que separa os grãos, deslocando os grãos quebrados para a moega horizontal, enquanto os grãos inteiros permanecem presos no interior do cilindro para posterior descarregamento. As amostras processadas foram pesadas em balança de precisão (Marte Científica, modelo AD330, São Paulo, Brasil), para posterior realização da classificação manual do arroz conforme Instrução Normativa 06/2009, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2009).

#### 4.7 CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICO-QUÍMICA DO ARROZ

Para a realizar determinação de amido (ST), proteína bruta (CP), gordura (FAT), cinzas (AS), fibra bruta (CF) nas amostras de grãos de arroz foi utilizada a Espectroscopia de Infravermelho Próximo (NIRS) (Metrohm, espectrômetro DS2500, Herisau, Suíça), equipamento com alta precisão óptica. As amostras foram homogeneizadas e colocadas na cápsula de amostragem, em triplicata. A análise consiste em iluminar a amostra com radiação de um comprimento de onda específico na região do infravermelho próximo e medir a diferença entre a quantidade de energia emitida pelo espectroscópio e refletida pela amostra para o detector. Essa diferença é medida em várias bandas, criando um espectro para cada amostra. O registro dos dados espectrais foi feito no modo de refletância, na faixa espectral de 400 nm-2500 nm.

#### 4.8 ANÁLISE DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

As difrações foram obtidos em um difratômetro de pó de raios-X Rigaku, modelo Miniflex 300, operando no modo step, com velocidade de varredura de 0,5 se varredura de 0,03°, em ângulos de 5 a 100°. Este equipamento possui radiação Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 1,54184 \text{ \AA}$ ) e fonte de alimentação com 30 kV e 10 mA. O índice de cristalinidade ( $R_c$ ) foi determinado de acordo com a equação:

$$R_c = \left( \frac{A_c}{A_c + A_a} \right) \times 100 \quad (2)$$

onde,

$R_c$ : Cristalinidade relativa (%)

$A_c$ : área cristalina

$A_a$ : área amorfa.

#### 4.9 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As análises de microscopia foram realizadas em um microscópio eletrônico de varredura (Carl Zeiss, Sigma 300 VP, Jena, Alemanha) com filamento de emissão de campo (FEG- Field Emission Gun) do tipo Schotky (filamento de tungstênio coberto com óxido de zircônio), equipado com uma coluna Gemini (Carl Zeiss, Sigma 300 VP, Jena, Alemanha). As imagens foram obtidas utilizando o detector secundário (SE2) em modo de alto vácuo ( $1 \times 10^{-9}$  bar), energia de 1, 5 e 6 kV, distância de trabalho de 5 mm e acima de 35 mm, abertura de 15  $\mu\text{m}$ , e ampliações. Para a energia dispersiva de raios X (EDS), foi utilizado o detector de raios X EDS (Bruker, Quantax 200-Z10, Billerica, Massachusetts, US), equipado com janela de quartzo de 10  $\text{mm}^2$  e software ESPRIT.

#### 4.10 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados obtidos foram analisados pelo programa de computador Sisvar a 5% de probabilidade, em seguida, foi realizada uma análise de regressão e análises estatísticas multivariadas. Para verificar a associação entre os tratamentos e as variáveis analisadas, assim os dados foram submetidos à análise de componentes principais e correlações de Pearson, com auxílio do software RBio.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 MOVIMENTAÇÃO DO AR NA COLUNA DE GRÃOS NOS SILOS ARMAZENADORES COM FLUXO DE AR PARA SECAGEM

Na Tabela 5 são apresentadas as informações referentes a movimentação de ar dentro do silo secador, na entrada, na saída, na base e no plenum. Os pontos observados correspondem a velocidade, vazão e fluxo de ar. Do qual, nota-se que no Silo 1 ambos os exaustores possuem boa velocidade de entrada do ar, porém a de saída já encontra-se abaixo das demais, o que reflete na vazão do plenum, apresentando problema na uniformidade de secagem.

Tabela 5 – Velocidades, vazões e fluxos de ar nos silos armazenadores com fluxo de ar para secagem.

Silo	E	A <sub>e</sub>	V <sub>e</sub>	Q <sub>e</sub>	F <sub>e</sub>	A <sub>s</sub>	V <sub>s</sub>	Q <sub>s</sub>	F <sub>s</sub>	A <sub>b</sub>	F <sub>p</sub>	Q <sub>p</sub>
1	1	0,52	4,30	8.049	257,88	0,42	1,58	2.376	94,28	262,88	0,35	5.520
	2	0,52	5,25	9.828	315,00	0,42	1,58	2.376	94,28	262,88	0,35	5.520
2	1	0,52	4,00	7.488	240,00	0,42	1,72	2.592	102,85	262,88	0,39	6.151
	2	0,52	4,69	8.779	281,37	0,42	1,72	2.592	102,85	262,88	0,39	6.151
3	1	0,52	4,16	7.787	249,58	0,42	1,68	2.520	100,00	262,88	0,38	5.993
	2	0,52	4,75	8.892	285,00	0,42	1,68	2.520	100,00	262,88	0,38	5.993
4	1	0,52	4,11	7.693	246,57	0,42	1,68	2.520	100,00	262,88	0,38	5.993
	2	0,52	4,47	8.367	268,17	0,42	1,68	2.520	100,00	262,88	0,38	5.993
5	1	0,52	5,25	9.828	315,00	0,42	1,69	2.556	101,43	262,88	0,39	6.151
	2	0,52	5,05	9.453	302,98	0,42	1,69	2.556	101,43	262,88	0,39	6.151

*E*: exaustor, *A<sub>e</sub>*: área de entrada (m<sup>2</sup>), *V<sub>e</sub>*: velocidade do ar de entrada (m s<sup>-1</sup>), *Q<sub>e</sub>*: vazões de ar de entrada (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>), *F<sub>e</sub>*: fluxo de ar de entrada (m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>), *A<sub>s</sub>*: área de saída do exaustor (m<sup>2</sup>), *V<sub>s</sub>*: velocidade de saída do ar (m s<sup>-1</sup>), *Q<sub>s</sub>*: vazões de ar de saída (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>), *F<sub>s</sub>*: fluxo de ar de saída (m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>), *A<sub>b</sub>*: área da base do silo (m<sup>2</sup>), *F<sub>p</sub>*: fluxo de ar no plenum (m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>), *Q<sub>p</sub>*: vazões de ar no plenum (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>).

Os resultados indicaram um aumento da pressão estática com aumento da altura da coluna de grãos, dificultando a aeração, que associados a baixa homogeneidade dos lotes de grãos, quanto aos teores de água e impurezas, alterou significativamente a velocidade e a distribuição do ar de secagem, resultando em um baixo rendimento de secagem (KHATCHATOURIAN e SAVICKI, 2004). Resultados similares, foram observados em estudos em silos-secadores, na secagem de grãos de trigo e arroz com altos teores de água,

quando houve problemas com elevações da temperatura da massa de grãos, em função do aumento do tempo de secagem e o baixo rendimento do processo (PEREZ et al., 2015).

Conforme com os resultados obtidos na Tabela 6, houve uma redução da vazão específica do ar com o carregamento do silo. A vazão do ar com o silo cheio correspondeu a 43% da vazão inicial, enquanto na vazão específica a redução foi ainda maior, chegando à 6,4% da vazão inicial. A vazão específica obtida foi abaixo do recomendado para secagem de grãos de arroz armazenados com 20% (b.u.) de teor de água, em pelo menos  $1,5 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ , para a realização de uma secagem eficiente (Silva et al., 2008). Nas condições experimentais avaliadas na simulação realizada, caracterizou-se que o sistema implementado para movimentação do ar pode atender cerca de 32% do silo armazenador com fluxo de ar para secagem, para que o fluxo de ar flua adequadamente entre as camadas de grãos.

Tabela 6 – Valores obtidos na simulação plena do sistema silos armazenadores com fluxo de ar para secagem.

Percentual de carregamento do silo (%)	Altura média da camada de grãos (m)	Vazão de ar ( $\text{m}^3 \text{ min}^{-1}$ )	Vazão específica de ar ( $\text{m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ )	Pressão estática (mmca)
0,00	0	1750,20	-	-
14,82	2,22	1.646,70	4,71	99,76
23,33	3,49	1.353,30	2,46	121,39
31,85	4,76	1.181,19	1,57	139,08
40,37	6,04	1.064,01	1,12	154,40
48,89	7,31	977,36	0,85	168,08
57,41	8,59	909,78	0,67	180,57
65,93	9,86	855,10	0,55	192,12
74,44	11,13	809,61	0,46	202,91
82,96	12,41	770,98	0,39	213,08
91,48	13,68	737,61	0,34	222,72
100,00	14,96	708,40	0,30	231,90

## 5.2 MOVIMENTAÇÃO DE AR NA MASSA DE GRÃOS COM LIMPEZA DE RETIFICAÇÃO

Os resultados de velocidades, vazões e fluxos de ar, temperaturas e umidade relativa do ar na entrada e na saída dos exaustores e acima da coluna de grãos armazenados encontram-se na Tabela 7, em função de diferentes condições de repeneiramento. Os silos armazenadores com fluxo de ar para secagem em que não foi realizado o processo completo de repeneiramento pode ter ocorrido heterogeneidade na pressão estática da coluna de grãos, possibilitando maior saída do ar em pontos específicos e interferindo na distribuição do ar e na secagem, visto que pontos superiores da massa de grãos não houve, praticamente, fluxo e saída de ar.

Tabela 7 – Avaliação da movimentação de ar na massa de grãos armazenados em silo armazenador com fluxo de ar para secagem a partir de diferentes processos de limpeza de retificação.

Silo	Condição do silo	Variáveis	E	S - SA	S - CA	Cabos de termometria					
						Cabo 1	Cabo 2	Cabo 3	Cabo 4	Cabo 5	Cabo 6
Silo 1	Vazio	$V$ ( $m\ s^{-1}$ )	29,17	28,05	29,72	-	-	-	-	-	-
		$Q$ ( $m^3\ s^{-1}$ )	15,17	14,59	15,45	-	-	-	-	-	-
		$F$ ( $m^3\ min^{-1}\ t^{-1}$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		$T$ ( $^{\circ}C$ )	22,80	20,50	18,80	-	-	-	-	-	-
		UR (%)	-	44,00	-	-	-	-	-	-	-
Silo 2	Com limpeza de retificação	$V$ ( $m\ s^{-1}$ )	22,20	15,40	15,40	0,00	0,02	0,00	0,02	0,02	0,00
		$Q$ ( $m^3\ s^{-1}$ )	11,57	6,47	6,47	0,00	0,001	0,00	0,001	0,001	0,00
		$F$ ( $m^3\ min^{-1}\ t^{-1}$ )	0,33	0,18	0,18	0,00	0,00002	0,00	0,00002	0,00002	0,00
		$T$ ( $^{\circ}C$ )	25,00	22,30	19,30	34,00	34,00	32,50	26,50	30,00	32,50
		UR (%)	-	45,00	-	-	-	-	-	-	-
Silo 3	Em processo de limpeza de retificação	$V$ ( $m\ s^{-1}$ )	20,60	12,22	12,22	0,00	0,01	0,0	0,00	0,00	0,00
		$Q$ ( $m^3\ s^{-1}$ )	10,74	6,35	6,35	0,00	0,0007	0,0	0,00	0,00	0,00
		$F$ ( $m^3\ min^{-1}\ t^{-1}$ )	0,45	0,26	0,26	0,00	0,00002	0,0	0,00	0,00	0,00
		$T$ ( $^{\circ}C$ )	25,00	27,40	22,30	31,5	30,90	29,60	27,60	30,00	29,60
		UR (%)	-	60,00	-	-	-	-	-	-	-
Silo 4	Sem limpeza de retificação	$V$ ( $m\ s^{-1}$ )	21,20	16,20	16,20	0,03	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
		$Q$ ( $m^3\ s^{-1}$ )	11,02	8,42	8,42	0,002	0,0002	0,00	0,00	0,0002	0,0002
		$F$ ( $m^3\ min^{-1}\ t^{-1}$ )	0,36	0,27	0,27	0,00007	0,00002	0,00	0,00	0,00002	0,00002
		$T$ ( $^{\circ}C$ )	25,00	22,30	19,30	27,80	29,30	28,20	29,30	29,30	32,50
		UR (%)	-	45,00	-	-	-	-	-	-	-
Silo 5	Parcialmente com limpeza de retificação	$V$ ( $m\ s^{-1}$ )	23,40	15,50	15,10	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00
		$Q$ ( $m^3\ s^{-1}$ )	12,17	8,06	8,06	0,00	0,00	0,002	0,00	0,00	0,00
		$F$ ( $m^3\ min^{-1}\ t^{-1}$ )	0,81	0,54	0,54	0,00	0,00	0,0001	0,00	0,00	0,00
		$T$ ( $^{\circ}C$ )	23,50	21,80	19,30	21,40	23,00	22,80	23,40	22,00	26,50
		UR (%)	-	45,00	-	-	-	-	-	-	-

$V$ : velocidade do ar,  $Q$ : vazão de ar,  $F$ : fluxo de ar,  $T$ : temperatura do ar, UR: umidade relativa do ar, E: entrada do ar no exaustor, S: saída do ar do exaustor, SA: sem aquecimento do ar, CA: com aquecimento do ar.

Observou-se uma redução do fluxo de ar de entrada e saída do exaustor, chegando a 45%. Enquanto que, nos pontos superiores da massa de grãos não observou-se saída de ar. No Silo 4, a massa de grãos não passou pelo processo de repeneiramento, e assim teve a maior influência dos efeitos de impurezas e heterogeneidade dos lotes sobre a compactação e o fluxo de ar. A sobrecarga e a compactação da massa de grãos, precisa ser considerada para operar o sistema de aeração, pois tem influência direta no aumento da pressão estática ao longo do tempo de armazenamento nos silos armazenadores com fluxo de ar para secagem (TURNER et al., 2016). Sugere-se que a heterogeneidade da massa de grãos, em relação aos teores de água dos lotes armazenados somados aos altos teores de impurezas impuseram maiores pressões estáticas, entre camadas da massa de grãos, influenciando no desempenho dos exaustores e no rendimento da secagem.

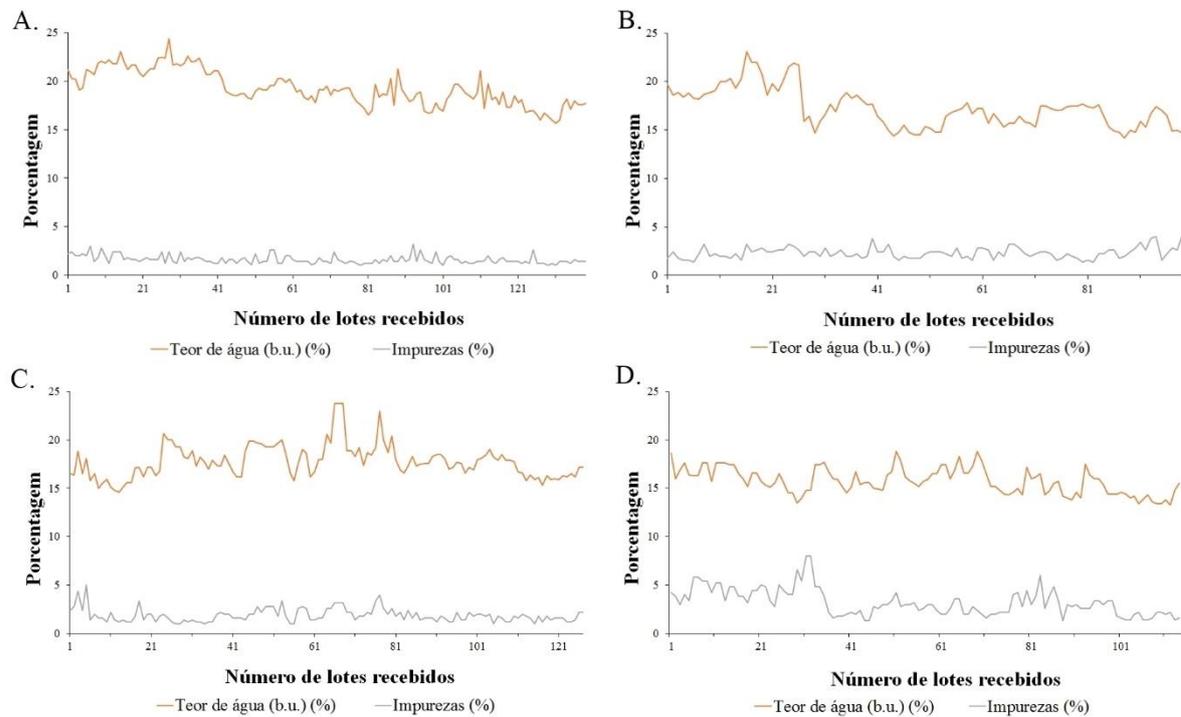
Quando o ar foi submetido ao aquecimento artificial e a desumidificação do ar de secagem, obteve-se uma condição de umidade de equilíbrio higroscópico mais baixa na saída dos exaustores. Entretanto, não verificou-se alteração na eficiência de secagem, indicando que a vazão e a distribuição do ar no interior do silo armazenador com fluxo de ar para secagem não ocorreu adequadamente, tornando sem efeito o aquecimento do ar de secagem (HOELTZ et al., 2009).

Os resultados obtidos indicaram uma turbulência do fluxo de ar intergranular em função da interferência da heterogeneidade de umidade e impurezas na massa de grãos de arroz. Foi possível verificar que houve fluidez do ar na porosidade da massa de grãos, porém, em seguida, o ar passa a ser interceptado por partículas adensadas, promovendo sua circulação entorno desta barreira, causando uma turbulência intergranular em função do aumento dos volumes de ar nos poros estreitos estabelecidos. As mudanças bruscas de volume, podem ocasionar mudanças de pressão e temperatura da massa de grãos (OLATUNDE et al., 2017). Pois, a pressão estática aumenta à medida em que há o aumento da compactação dos grãos de arroz, isso principalmente em decorrência das características físicas dos grãos, como a presença de impurezas (ROCHA et al., 2020).

### 5.3 RELAÇÃO TEORES DE ÁGUA E IMPUREZAS NA SECAGEM E QUALIDADE DOS GRÃOS DE ARROZ

Durante a colheita foram coletadas amostras de cada carga, para o adequado acompanhamento do enchimento dos silos no que refere-se aos teores de água e impurezas, como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Acompanhamento dos lotes de grãos de arroz armazenados nos silos secadores (A) Silo 2, 19U/1,5I; (B) Silo 3, 17U/2,5I; (C) Silo 4, 18U/2,0I; e (D) Silo 5, 16U/3,0I.



Fonte: Autor.

Na Tabela 8 foram apresentados os resultados da análise de variância, sendo que, a massa específica aparente foi a única variável que não apresentou diferença estatística significativa, para nenhum dos fatores testados.

Tabela 8 – Análise de variância das análises físico-químicas e classificação dos grãos arroz armazenados em silo armazenador com fluxo de ar para secagem.

FV	TA	ME	R	RE	Q	GE	D	P	G	F	C	A
	Pr>Fc	Pr>Fc	Pr>Fc	Pr>Fc	Pr>Fc	Pr>Fc	Pr>Fc	Pr>Fc	Pr>Fc	Pr>Fc	Pr>Fc	Pr>Fc
Teor de água/Impurezas	0,0000**	0,0220 <sup>NS</sup>	0,0000**	0,0000**	0,0000**	0,0000**	0,0357 <sup>NS</sup>	0,0000**	0,0000**	0,0000**	0,0000**	0,0000**
Posição	0,0000**	0,3089 <sup>NS</sup>	0,0000**	0,0000**	0,0000**	0,0040**	0,0000**	0,0000**	0,0000**	0,0002**	0,0000**	0,0000**
Teor de água/Impurezas x Posição	0,0000**	0,0637 <sup>NS</sup>	0,0000**	0,0000**	0,0000**	0,0001**	0,0000**	0,0000**	0,0000**	0,0004**	0,0000**	0,0000**
CV (%)	1,20	9,35	1,23	2,34	6,18	32,96	35,03	0,77	1,40	1,37	0,0000**	0,08
Média Geral	12,44	523,92	71,74	58,28	8,55	2,61	2,21	8,39	1,82	2,10	1,03	71,67

\*\* : Significativo a 1% de probabilidade de erro (Pr<0,01), <sup>NS</sup>: Não Significativo (Pr>0,01), FV: Função de variação, CV: Coeficiente de variação, TA: Teor de água, ME: Massa específica, R: Renda; RE: Rendimento, Q: Quebrados, GE: Gessados, D: Defeitos, P: Proteína, G: Gordura, F: Fibras, C: Cinzas; A: Amido.

Tabela 9 – Análise física dos grãos de arroz com diferentes teores de água e impurezas armazenados em silo armazenador com fluxo de ar para secagem.

Posição amostra gem	Teor de água (%)				Renda (%)				Rendimento (%)			
	19U/1,5I	18U/2,0I	17U/2,5I	16U/3,0I	19U/1,5I	18U/2,0I	17U/2,5I	16U/3,0I	19U/1,5I	18U/2,0I	17U/2,5I	16U/3,0I
1	14,07 Bb	13,17 Cb	14,83 Aa	11,37 Dc	71,41 Babc	71,36 Bab	69,14 Cb	73,49 Abc	63,48 Aab	57,81 Bab	50,38 Ce	57,74 Bb
2	13,83 Bb	15,7 Aa	11,53 Cbc	11,77 Cc	71,82 ABabc	67,67 Cde	72,68 Aa	70,78 Bde	63,72 Aab	51,26 Cde	56,39 Bcd	52,30 Cc
3	14,83 Ba	15,87 Aa	10,90 Def	11,70 Cc	70,52 Bb	66,49 Ce	73,14 Aa	72,17 ABbcd	60,70 Abc	52,30 Cde	57,10 Bbcd	55,66 Bbc
4	14,57 Ba	15,73 Aa	10,83 Def	11,63 Cc	71,13 BCbc	69,65 Cbcd	71,89 ABa	73,56 Abc	62,04 Aab	56,21 Babc	55,81 Bcd	58,23 Bb
5	14,07 Bb	15,87 Aa	11,60 Cb	11,50 Cc	71,04 Abc	69,07 Bbcd	72,10 Aa	72,61 Abcd	61,07 Ab	54,58 Cbcde	54,89 Ccd	58,04 Bb
6	13,93 Bb	15,77 Aa	11,00 Dde	11,70 Cc	71,68 Aabc	68,81 Bcde	72,40 Aa	71,56 Acde	62,81 Aab	53,48 Ccde	53,86 BCde	56,67 Bb
7	11,13 Bd	11,33 Bc	10,50 Cfg	12,97 Aa	73,53 ABa	69,57 Cbcd	71,83 Ba	74,06 Ab	64,16 Aab	50,98 Ce	60,63 Bab	62,41 ABa
8	11,33 Bcd	11,07 Bc	10,27 Cg	12,90 Aa	72,22 Aabc	73,45 Aa	72,82 Aa	73,44 Abc	61,18 Ab	58,07 Bab	63,46 Aa	63,83 Aa
9	11,57 Bc	11,10 Cc	11,40 BCbcd	12,23 Ab	70,24 Bb	72,22 Aa	72,35 Aa	69,52 Be	57,09 Ac	56,86 Aabc	55,40 ABcd	52,86 Bc
10	10,93 Bd	10,93 Bc	10,73 Bef	13,13 Aa	73,14 Bab	72,89 Ba	72,29 Ba	76,51 Aa	65,40 Aa	59,14 Ba	57,98 Bbc	65,66 Aa
11	11,10 Bd	10,93 Bc	11,13 Bcde	12,90 Aa	71,96 ABabc	71,15 Babc	73,43 Aa	73,83 Abc	62,17 Bab	54,88 Cbcd	60,39 Bab	65,13 Aa

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula nas colunas não diferem entre si à 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Ao observar a influência da relação do teor de água e impureza dos grãos armazenados, a relação 19U/1,5I, com o menor percentual de impurezas e maior teor de água obteve-se maior rendimento de secagem, bem como menores percentuais de grãos com defeitos, quebrados e gessados. Os grãos de arroz nas condições iniciais de 19% (b.u.) de teor de água e 1,5% de impurezas, após secagem, entrou em equilíbrio higroscópico com umidade de 11,10% (b.u.) e permaneceu ao longo do armazenamento. Na secagem dos lotes com 18U/2,0I e 17U/2,5I foi possível identificar nas camadas inferiores do silo armazenador com fluxo de ar para secagem alterações na qualidade física dos grãos, enquanto que, os lotes de grãos com 16U/3,0I teve os maiores índices de grãos quebrados na parte superior do silo armazenador com fluxo de ar para secagem (Tabela 8).

Os grãos amostrados dos pontos localizados na parte inferior do silo secador (7 à 11) alcançaram teores de água abaixo de 12% (b.u.), entrando em equilíbrio higroscópico com o ar intergranular e promovendo nas camadas superiores uma frente de secagem. Enquanto que, nos grãos amostrados nos pontos localizados na parte superior do silo armazenador com fluxo de ar para secagem, verificou-se para os tratamentos com as condições iniciais de 19U/1,5I uma redução dos teores de água para 13% (b.u.) permanecendo em equilíbrio higroscópico ao longo do armazenamento. Entretanto, nos lotes com 18U/2,0I, os teor de água permaneceram superiores aos demais tratamentos, o que indica influência dos altos percentuais de impurezas na eficiência de secagem (Tabela 8).

A taxa de evaporação da água dos grãos de arroz diminuiu com o aumento da distância da seção de entrada do ar de secagem. Observou-se que as camadas de grãos próximos ao piso do silo armazenador com fluxo de ar para secagem dos lotes 16U/3,0I chegaram ao final da secagem com teores de água entre 12-13% (b.u.). Já as camadas superiores, encontram-se com 11,6-11,9%, mostrando diferença significativa em todos os pontos, quando comparado aos demais silos armazenadores com fluxo de ar para secagem, exceto nos pontos 2 e 5, que apresentaram resultados próximos aos do tratamento de 17U/2,5I. Segundo alguns autores, as camadas de arroz localizado nas partes superiores do secador de camada fixa podem permanecer em equilíbrio higroscópico, com teores de água elevados, do que aqueles grãos mais próximos da frente de secagem (NAGHAVI et al., 2010). Assim, com o aumento da espessura da camada de grãos exige-se que o fluxo de ar intergranular seja superior a pressão estática da coluna da massa de grãos e que o ar de secagem esteja suficientemente aquecido para promover o processo de remoção de água nos grãos (poder secante), até alcançar as condições ideais de umidade dos grãos para um armazenamento seguro (KUMORO et al., 2019).

Na avaliação da qualidade física observou-se nos pontos inferiores do silo armazenador com fluxo de ar para secagem amostrados, resultados superiores da análise de renda e rendimento de grãos inteiros. No entanto, no ponto 9 verificou-se que os efeitos dos tratamentos com 19U/1,5I e 16U/3,0I apresentaram resultados negativos, baixos percentuais de renda e rendimento, destoando dos demais resultados. Sugere-se que este resultado esteja relacionado ao excesso de fluxo de ar no mesmo ponto, superaquecendo a massa de grãos e causando danos físicos. A passagem sucessiva de ar no mesmo está ligada a maior pressão estática em regiões com altos teores de água e impurezas, que formam uma barreira a passagem do ar de secagem (Tabela 9).

Observou-se percentuais de grãos defeituosos (Tabela 10) na parte inferior do silo, no tratamento de 16U/3,0I. O resultados ocorreu pelo excesso de secagem e aos baixos teores de água inicial dos grãos e da presença de altos teores de impurezas. Em relação a posição no silo armazenador com fluxo de ar para secagem, observou-se nos pontos 8 e 10 localizados na parte inferior os melhores resultados de grãos inteiros. Normalmente, os defeitos nos grãos são causados pelos gradientes de umidade e excesso de secagem nos grãos, causando rachaduras internas e, posteriormente trincas durante o beneficiamento (TUMPANUVATR et al., 2018).

A condição de 19U/1,5I teve diferenças significativas positivas em relação dos demais tratamentos, quanto a análise de grãos quebrados, em todos os pontos da parte superior do silo armazenador com fluxo de ar para secagem e em alguns pontos da parte inferior. Esse resultado indicou que os índices mais baixos de impurezas permitiram uma distribuição mais uniforme do ar de secagem, reduzindo a possibilidade de superaquecimento do ar de secagem e, conseqüentemente, menores percentuais de defeitos físicos nos grãos. As relação 17U/2,5I e 16U/3,0I apresentaram resultados similares, indicando maiores percentuais de grãos quebrados, especialmente nos pontos superiores do silo armazenador com fluxo de ar para secagem. Os grãos quebrados acabam se posicionando na fração superior das camadas de grãos no silo armazenador com fluxo de ar para secagem.

Os resultados de grãos gessados foram inversos em relação aos grãos quebrados para os tratamentos 19U/1,0I, 17U/2,5I e 16U/3,0I. Explica-se esses resultados com base na característica física dos grãos. Os grãos gessados possuem características de opacidade, a qual é causada pelo arranjo dos grânulos de amido e proteína na composição do grãos. O arranjo dos grânulos ocorrem de uma forma não compacta, formando espaços entre as partículas de amido e proteína (YOSHIOKA et al., 2007). Assim, os grãos de arroz gessados tem massa específica aparente menor que os demais grãos, o que possibilita ao longo do tempo uma predisposição a se depositarem ao fundo do silo. Nas análises de defeitos totais, verificou-se um maior

percentual de grãos avariados nas camadas inferiores do silo armazenador com fluxo de ar para secagem, acompanhando os resultados obtidos em relação a grãos gessados e quebrados. Entretanto, entre os níveis de teores de água e impurezas, não observou-se efeitos e diferenças significativas quanto a qualidade dos grãos.

Desta forma, os resultados apresentados para grãos quebrados e gessados indicam como possível causa para tal localização em maior percentual nas regiões analisadas em decorrência da heterogeneidade dos lotes durante o processo de carregamento dos silos. Pois, a tendência para aumento de grãos quebrado nestas condições de secagem e armazenagem encontra-se nas camadas inferiores, que ficam mais expostas ao ar de secagem, altas temperaturas, conseqüentemente ocorrendo a secagem excessiva dos grãos e proporcionando o surgimento de trincas e fissuras.

Tabela 10 – Classificação física do grãos de arroz com diferentes teores de água e impurezas armazenados em silo armazenador com fluxo de ar para secagem.

Posição amostra gem	Quebrados (%)				Gessados (%)				Defeitos (%)			
	19U/1,5I	18U/2,0I	17U/2,5I	16U/3,0I	19U/1,5I	18U/2,0I	17U/2,5I	16U/3,0I	19U/1,5I	18U/2,0I	17U/2,5I	16U/3,0I
1	5,62 Da	6,92 Cd	16,62 Aa	11,55 Bc	1,16 Ba	3,98 Aab	1,06 Bb	1,71 Bb	0,99 Ac	2,53 Ab	1,13 Ad	2,34 Aa
2	5,63 Ca	9,75 Babc	13,08 Abc	13,12 Aab	1,45 Ba	4,43 Aab	1,97 Bab	3,07 ABab	0,92 Ac	2,12 Ab	1,14 Ad	2,23 Aa
3	6,11 Da	8,72 Cc	13,67 Ab	12,18 Babc	2,05 ABa	3,58 Aab	1,40 Bab	2,73 ABab	1,42 Abc	1,68 Ab	1,00 Ad	1,56 Aa
4	5,91 Da	9,46 Cbc	13,31 Abc	11,79 Bbc	2,02 Aa	2,46 Ab	1,58 Aab	2,13 Ab	1,01 Ac	1,42 Ab	1,17 Ad	1,35 Aa
5	5,02 Dab	9,74 Cabc	13,57 Ab	12,07 Babc	2,94 Aa	2,55 Ab	2,21 Aab	1,40 Ab	1,94 Abc	2,00 Ab	1,30 Acd	0,98 Aa
6	5,07 Cab	9,78 Babc	12,68 Abc	12,22 Aabc	2,24 Ba	4,40 Aab	2,22 Bab	1,58 Bb	1,45 Bbc	1,64 Bb	3,75 Aab	0,90 Ba
7	3,37 Cc	10,24 Aab	5,99 Bc	4,07 Cd	3,07 ABa	3,55 ABab	2,35 Bab	4,55 Aa	2,80 Babc	4,65 Aa	2,83 Babcd	2,87 Ba
8	3,93 Bbc	6,86 Ad	5,04 Bc	4,23 Bd	2,30 BCa	5,19 Aa	1,27 Cb	3,25 Bab	4,74 Aa	3,17 ABab	2,99 Babcd	2,14 Ba
9	5,57 Da	9,58 Cabc	12,08 Bc	13,23 Aa	2,92 Aa	2,64 Ab	2,77 Aab	2,21 Ab	4,50 Aa	3,01 ABab	1,86 BCbcd	1,03 Ca
10	3,98 Cbc	8,78 Ac	6,28 Bc	4,73 Cd	2,28 Aa	2,46 Ab	3,70 Aa	3,46 Aab	1,46 Bbc	2,40 Bb	4,13 Aa	2,62 ABa
11	3,65 Cbc	11,00 Aa	5,91 Bc	4,14 Cd	2,98 Aa	2,53 Ab	2,89 Aab	2,23 Aab	3,16 Aab	2,59 Aab	3,33 Aabc	2,94 Aa

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula nas colunas não diferem entre si à 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Na avaliação da qualidade físico-química do arroz (Tabela 11), verificou-se que os níveis de proteína bruta variaram entre 7,50 à 10,86%, encontrando-se dentro da faixa esperada para o produto. Nas amostragens realizadas nos pontos de descarregamento (inferiores do silo armazenador com fluxo de ar para secagem) obtiveram os maiores teores de proteínas, mostrando os mesmos resultados em relação ao percentual de grãos gessados. Entretanto, as relações do teor de água e impurezas tiveram diferenças significativas em quase todos os pontos, contudo não indicaram predominância de maiores ou menores valores entre os tratamentos.

O percentual de gordura mostrou uma diferença significativa de 0,38% para a condição de 19U/1,5I, de 0,43% em relação a 18U/2,0I, de 0,24% para 17U/2,5I e 0,32% para as condições de 16U/3,0I, com maiores valores nos pontos amostrados de 1 à 6, localizados na parte superior do silo armazenador com fluxo de ar para secagem. Os resultados indicaram que o teor de lipídio para as diferentes relações de teor de água e impurezas foi acima dos padrões recomendados médios de 0,36% em arroz branco (STORCK et al., 2005).

Os maiores percentuais de amido nos grãos foram obtidos nas condições de 19U/1,5I e 17U/2,5I, com índices entre 85-90% (BAO et al., 2004; STORCK et al., 2005). Mas as quatro condições experimentais, observou-se teores de amido abaixo do ideal para arroz branco polido. Verificou-se que para todos os pontos amostrados do silo armazenador com fluxo de ar para secagem, os resultados de amido foram inferiores ao padrão estabelecido. Além disto, observou-se que os grãos de arroz com menores teores de amido foram aqueles afetados fisicamente, com identificação e formação de fissuras na superfície. Por fim, o teor de amido não apresenta diferenças significativas, tanto entre os pontos observados, quanto à relação ao teor de água e impurezas, no entanto houve uma variação dos resultados, não seguindo um padrão de avaliação (Tabela 11).

O resultados de teores de amido abaixo dos padrões para o arroz indica a influência negativa do processo de secagem no sistema silo armazenador com fluxo de ar para secagem, uma vez que, o teor de amido dos grãos durante o processo de armazenamento, geralmente, é pouco afetado (KAMINSKI et al., 2013). A alta temperatura de secagem ou o aumento do tempo de secagem para a condição de teor de água adequados de armazenamento pode resultar em grãos com texturas mais dura. As mudanças na estrutura do amido ocorreram devido as fases dos grânulos fragmentados ou inchados e das moléculas de polímero que formam o amido, causando uma gelatinização parcial ou uma desnaturação das proteínas e formações de complexos entre amilose e lipídios (TRUONG et al., 2019).

Tabela 11 – Análise de proteína, gordura e amido de grãos de arroz com diferentes teores de água e impurezas armazenados em silo armazenador com fluxo de ar para secagem.

Posição amostra gem	Proteína (%)				Gordura (%)				Amido (%)			
	19U/1,5I	18U/2,0I	17U/2,5I	16U/3,0I	19U/1,5I	18U/2,0I	17U/2,5I	16U/3,0I	19U/1,5I	18U/2,0I	17U/2,5I	16U/3,0I
1	8,18 Bde	8,49 Ac	7,50 Cf	7,52 Cg	1,88 Ad	1,65 Cd	1,80 Bc	1,88 Ab	70,88 Dg	71,37 Cef	72,49 Ae	72,29 Bb
2	8,28 Acd	7,24 Cg	7,79 Be	8,38 Ad	1,89 Bcd	1,94 ABab	1,99 Aa	1,70 Cd	70,78 Cg	72,50 Bb	72,63 Ade	70,41 De
3	7,63 Cg	8,07 Ad	7,78 Be	7,61 Cfg	2,05 Aa	1,89 Bb	1,89 Bb	1,83 Cbc	70,35 Dh	71,22 Cf	72,79 Abc	71,38 Bd
4	7,72 Bfg	7,83 Be	8,07 Ad	8,15 Ae	1,97 Ab	1,90 Bb	1,81 Cc	1,98 Aa	72,94 Ab	71,50 Dde	72,21 Bf	72,02 Cc
5	8,45 Ac	7,46 Cf	8,16 Bcd	8,13 Be	1,89 Bcd	1,97 Aa	1,81 Cc	1,88 Bb	72,56 Ac	72,68 Aa	71,96 Bg	72,08 Bc
6	7,83 Bf	7,54 Cf	8,29 Abc	7,45 Cg	1,95 Abc	1,92 Aab	1,79 Bc	1,97 Aa	72,94 Ab	72,41 Bbc	71,35 Dh	72,12 Cc
7	9,11 Aa	10,29 Ab	8,15 Ccd	9,05 Ab	1,85 Ade	1,54 De	1,77 Bc	1,70 Cd	71,85 Bd	70,65 Cg	72,93 Ab	70,54 Ce
8	8,95 Bab	8,66 Cc	8,30 Dbc	9,18 Ab	1,71 Cf	1,64 Dd	1,91 Ab	1,81 Bc	71,45 Cf	72,33 Ac	70,09 Dj	72,04 Bc
9	9,12 Ba	10,24 Ab	8,88 Ca	7,77 Df	1,67 Cf	1,74 Bc	1,75 Bc	1,88 Ab	73,24 Aa	69,01 Dh	70,92 Ci	72,72 Ba
10	8,06 De	10,19 Ab	8,35 Cb	8,83 Bc	1,80 Ae	1,78 Ac	1,79 Ac	1,65 Bd	71,62 Be	71,59 Bd	72,71 Acd	71,25 Cd
11	8,79 Cb	10,86 Aa	7,76 De	9,37 Ba	1,68 Bf	1,77 Ac	1,80 Ac	1,69 Bd	71,97 Bd	67,42 Di	73,15 Aa	69,96 Cf

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula nas colunas não diferem entre si à 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Na avaliação de fibra bruta, observou-se que os resultados foram similares entre os tratamentos, embora os lotes de grãos com maiores teores de água (19U/1,5I) submetidos a secagem tiveram os menores percentuais, enquanto que, os tratamentos 17U/2,5I e 16U/3,0I apresentaram os maiores percentuais de fibra bruta (Tabela 12). Este resultado pode ter ocorrido pelos altos níveis de impurezas nos lotes armazenados, cujo o aumento do teor de fibra bruta nos grãos de arroz, subgrupo branco, pode estar relacionado ao aumento na quantidade de compostos que permanecem na parede celular durante o armazenamento, formado principalmente por celulose e hemicelulose, o que confere maior dureza aos grãos, reduzindo a qualidade da moagem e produzindo maiores teores de fibras (MILLATI et al., 2017).

O percentual de cinzas apresentou diferença significativa em todos os fatores avaliados, demonstrando uma tendência de aumento nos pontos inferiores de amostragem do silo armazenador com fluxo de ar para secagem. Esse resultado ocorreu porque nas camadas inferiores, os grãos sofreram maiores efeitos da temperatura do ar de secagem; pelas passagens sucessivas do ar, para exercer o processo de secagem. O aumento dos teores de cinzas está relacionado à degradação da fração orgânica do material vegetal em função da atividade metabólica dos grãos, promovendo alterações na composição mineral (SANTOS et al., 2019; SCARIOT et al., 2020).

Tabela 12 – Análise de fibras e cinzas de grãos de arroz com diferentes teores de água e impurezas armazenados em silo armazenador com fluxo de ar para secagem.

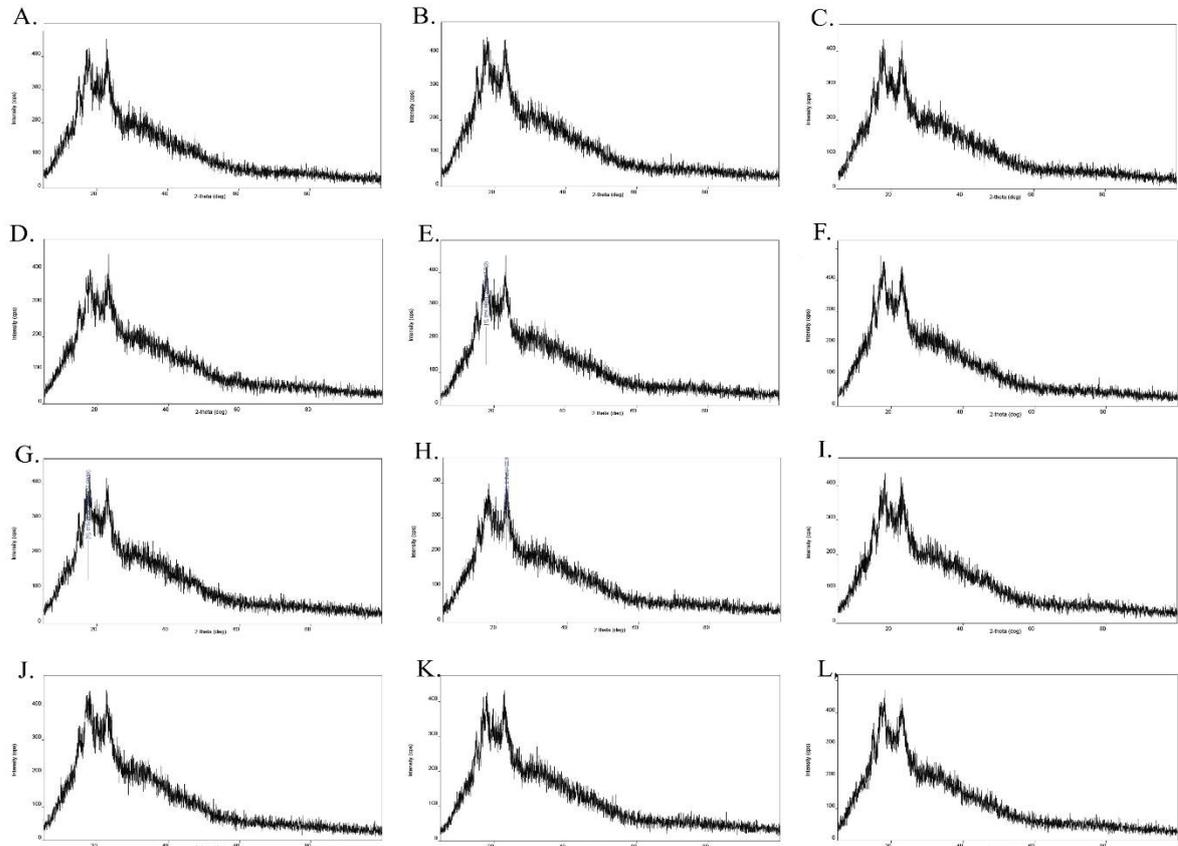
Posição amostragem	Fibra (%)				Cinzas (%)			
	19U/1,5I	18U/2,0I	17U/2,5I	16U/3,0I	19U/1,5I	18U/2,0I	17U/2,5I	16U/3,0I
1	2,10 Bab	2,11 ABabc	2,17 Aa	2,07 Ba	0,97 Bab	1,14 Aab	0,99 Bb	1,04 ABabc
2	2,08 Bab	2,15 Aa	2,15 Aa	2,12 ABa	0,85 Bbc	1,07 Aabc	1,02 Aab	1,05 Aabc
3	2,11 Aa	2,13 Aabc	2,12 Aa	2,10 Aa	0,83 Bc	1,06 Aabc	1,11 Aab	1,03 Aabc
4	2,08 Aab	2,12 Aabc	2,13 Aa	2,09 Aa	0,89 Babc	1,07 Aabc	1,13 Aa	0,92 Bcd
5	2,09 ABab	2,13 Aabc	2,14 Aa	2,06 Ba	0,93 Babc	1,06 Aabc	1,06 Aab	0,87 Bd
6	2,09 Bab	2,15 Aa	2,16 Aa	2,11 ABa	0,92 Cabc	1,08 ABabc	1,15 Aa	1,02 BCbc
7	2,09 Aab	2,09 Aabcd	2,13 Aa	2,12 Aa	0,94 Babc	1,17 Aa	1,07 Aab	1,16 Aa
8	2,06 Bab	2,08 Bbcd	2,16 Aa	2,09 Ba	1,02 Aa	1,12 Aabc	1,12 Aab	1,07 Aab
9	2,03 Cb	2,07 BCcd	2,13 Aa	2,12 ABa	0,97 Cab	1,00 BCc	1,09 ABab	1,12 Aab
10	2,03 BCb	2,02 Cd	2,17 Aa	2,09 Ba	0,93 Babc	1,02 Bbc	1,05 Aab	1,11 Aab
11	2,04 Bab	2,08 ABbcd	2,14 Aa	2,07 Ba	1,00 Ba	1,14 Aab	0,99 Bb	1,15 Aab

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula nas colunas não diferem entre si à 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Após as avaliações qualitativas, selecionou-se as amostras da condição de armazenamento com o menores, médios e maiores teores de amido: 19U/1,5I (Pontos 3, 7 e 9), 18U/2,0I (Pontos 3, 5 e 11), 17U/2,5I (Pontos 4, 8 e 11) e 16U/3,0I (Pontos 7, 9 e 11). Todas as relações de teores de água e impurezas apresentaram uma estrutura semi-cristalina tipo A, típica de cereais, com os principais ângulos de difração  $2\theta$  em  $15^\circ$ ,  $17^\circ$ ,  $18^\circ$ ,  $20^\circ$  e  $23^\circ$  (Figura 8). Porém foi observada uma diferença entre os picos, mesmo com a variação do teor de amido.

Os resultados referentes a cristalinidade relativa dos grãos de arroz nas diferentes relações de água e impurezas foi apresentada na Tabela 13. A cristalinidade relativa evidenciou resultados similares entre os tratamentos 18U/2,0I e 17U/2,5I, com maior cristalinidade nos grãos com teores médios de amido. As combinações intermediárias dos teores de impurezas e água, de maneira geral, permitiu melhor fluxo do ar de secagem no silo armazenador com fluxo de ar para secagem, com secagem excessiva em alguns pontos, e conseqüentemente alteração na cristalinidade relativa do amido. A cristalinidade relativa possui tendência de redução com o aumento da temperatura de secagem ou pelo tempo de secagem que o grão é submetido. Segundo estudos realizados com arroz, relataram-se uma redução na cristalinidade relativa do amido de arroz de 21,97% à 20,35% quando submetidos à secagem, resultado atribuído a uma possível diminuição das cadeias de amilopectina (RAMOS et al., 2019).

Figura 8 – Espectro de Difração de Raios-X dos grãos de arroz em função do teor de amido, em (A) baixo; (B) médio; (C) alto em 19U/1,5I; (D) baixo; (E) médio; (F) alto em 18U/2,0I; (G) baixo; (H) médio; (I) alto em 17U/2,5I; (J) baixo; (K) médio; e (L) alto em 16U/3,0I.



Fonte: Autor.

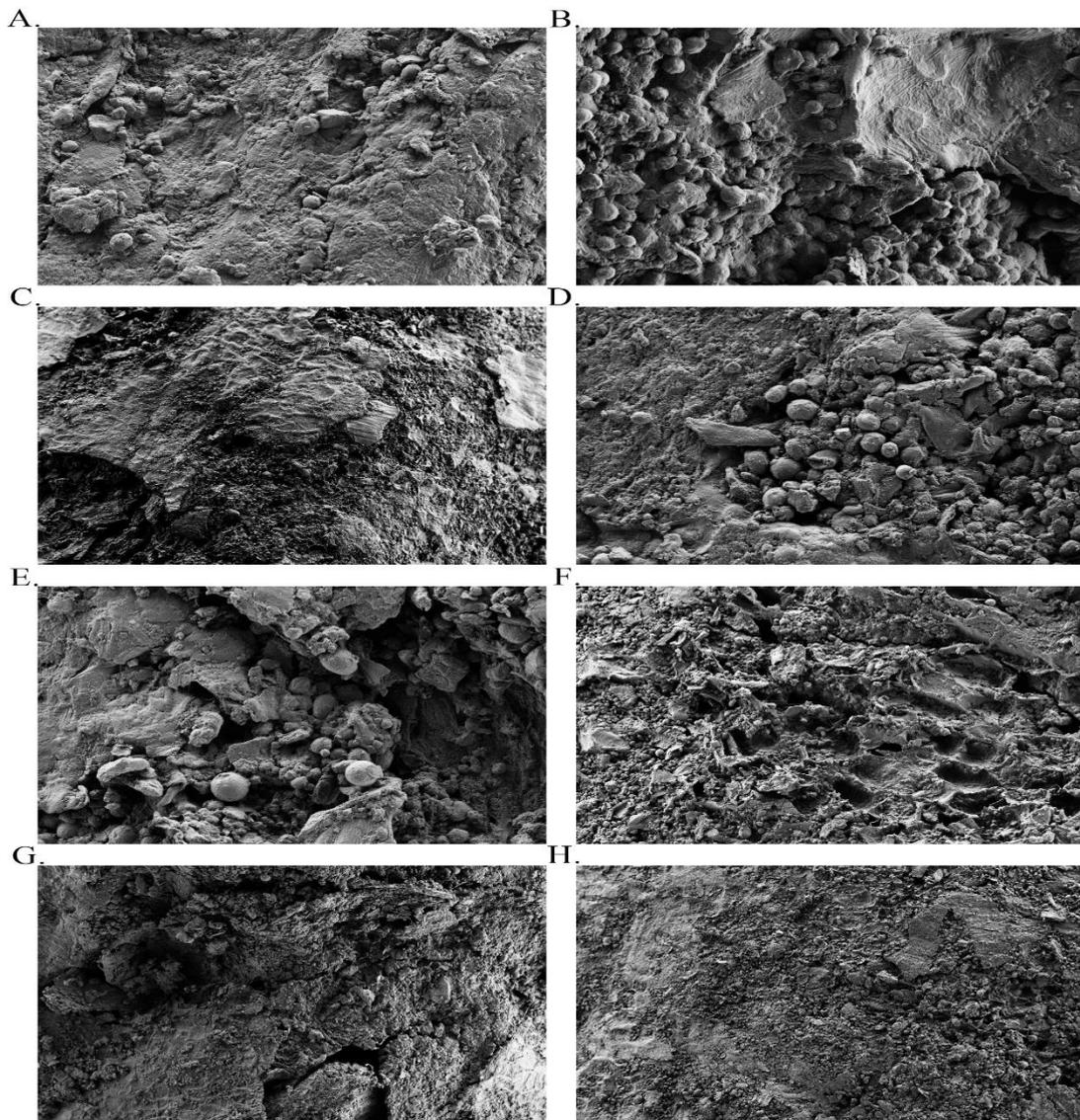
Tabela 13 – Cristalinidade relativa de grãos de arroz com diferentes teores amido.

Teor água / Impurezas	Baixo teor de amido	Médio teor de amido	Alto teor de amido
19U/1,5I	32,29%	25,97%	23,88%
18U/2,0I	19,35%	32,53%	26,92%
17U/2,5I	19,70%	32,79%	18,46%
16U/3,0I	21,20%	18,90%	25,93%

Na Figura 9 observou-se os resultados de imagens na estrutura dos grãos de arroz, para os quatro tratamentos, com os maiores e menores teores de amido. Todas as amostras com maiores danos físicos foram localizadas na parte inferior do silo armazenador com fluxo de ar para secagem (Figuras 9F e 9H, Ponto 11), submetidas ao maior impacto da temperatura de secagem pelas passagens sucessivas do aquecido. As Figuras 9B e 9D apresentaram os maiores teores de amido, com a estrutura caracterizada por maior rugosidade. Enquanto que, os grãos

com os menores teores de amido apresentaram uma superfície menos porosa. A distribuição do fluxo e da frente do ar de secagem nos lotes de grãos armazenados com maiores teores de água e menores teores de impurezas (19U/1,5I e 18U/2,0I) obtiveram melhores resultados de teores e na estrutura do amido.

Figura 9 – Microscopia Eletrônica de Varredura dos grãos de arroz em função do teor de amido, em (A) baixo 19U/1,5I; (B) alto 19U/1,5I; (C) baixo 18U/2,0I; (D) alto 18U/2,0I; (E) baixo 17U/2,5I; (F) alto 17U/2,5I; (G) baixo 16U/3,0I; e (H) alto 16U/3,0I.



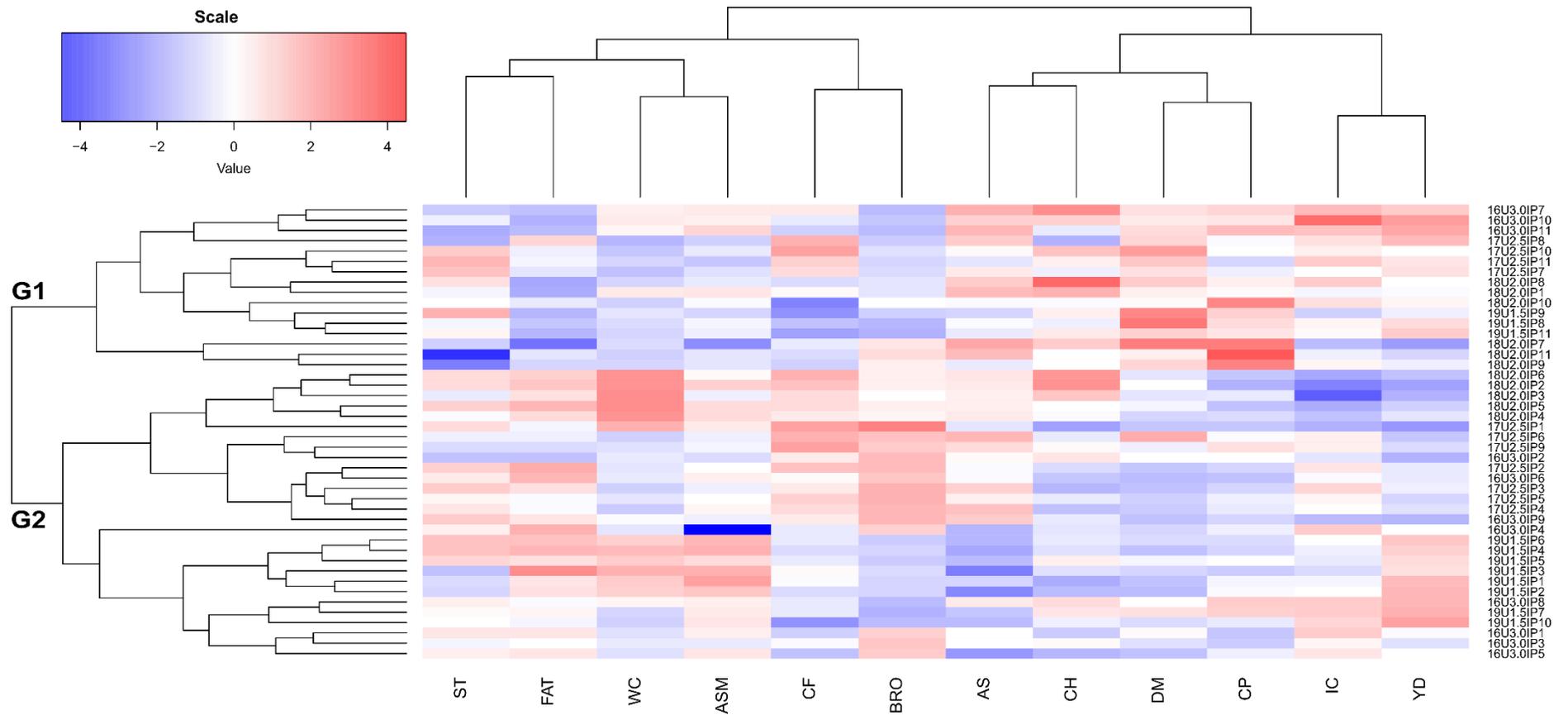
Fonte: Autor.

O heatmap (Figura 10) construído, demonstrou a existência de dois grupos similares sobre as condições de armazenamento. O G1 reuniu os tratamentos que proporcionaram menores médias dos resultados de gordura e percentuais de grãos quebrados e maiores médias

para grãos defeituosos e proteína bruta. O G2 reuniu os tratamentos com menores médias para grãos defeituosos e proteína bruta. Na análise de heatmap, observou-se que os tratamentos que compõem o G1 encontraram-se nos pontos superiores dos silos armazenadores com fluxo de ar para secagem, confirmando a relação direta com os resultados de avaliação da qualidade dos grãos. O tempo de exposição dos grãos a temperatura de secagem e a não secagem uniforme dos grãos pode ter exercido alterações na composição de proteína bruta, com a desnaturação (LANG et al., 2018).

Neste contexto, observa-se resultado similar ao grupo G1, que pela localização das amostras na parte superior do silo, ficam menos expostas a alta temperatura, assim observou-se maior quantidade de grãos quebrados e as menores médias de proteína bruta. O grupo G2, reuniu em sua maioria, os tratamentos localizados na parte inferior dos silos. Esse resultado, evidenciou os efeitos da frente de secagem, bem como a formação de pontos com maior pressão estática na parte superior do silo, que acabam por não receber o fluxo de ar de secagem de maneira homogênea, influenciando na secagem e na qualidade físico-química do arroz. O G2 apresentou menores médias para os grãos defeituosos e para a composição de proteína bruta. Destaca-se a boa relação das variáveis físico-químicas para a qualidade dos grãos, no tratamento de 19U/1,5I nos pontos de amostragem 1, 2, 7 e 10.

Figura 10 - Heatmap utilizando a distância euclidiana entre as condições de armazenamento dos grãos de arroz.

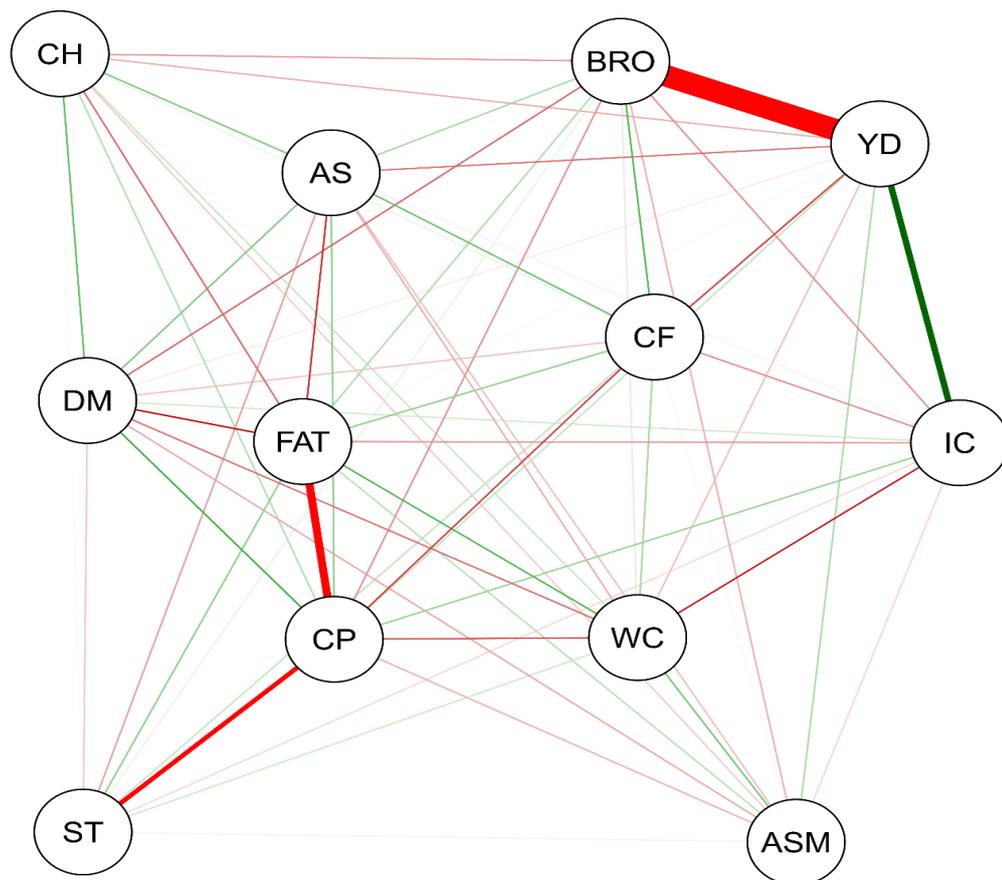


WC: teor de água, IC: renda, YD: rendimento, ASM: massa específica, BRO: grãos quebrados, DM: grãos defeituosos, CH: grãos gessados, CP: proteína, ST: amido, FAT: gordura, AS: cinzas, CF: fibras.

Fonte: Autor.

Na Figura 11 foi apresentada rede de correlações de Pearson entre as variáveis. As correlações negativas que merecem destaque são  $YD \times BRO$ ,  $FAT \times CP$  e  $CP \times ST$ . Por outro lado, a principal correlação positiva destacada foi  $IC \times YD$ . A rede de correlações de Pearson identificou a relação positiva entre o rendimento e renda, variáveis físicas que estão relacionadas diretamente. Isso se confirma ao analisar a relação negativa em destaque, entre o rendimento e os grãos quebrados, pois quanto menor o rendimento maior o número de grãos quebrados. Ainda, é possível identificar associação negativa da gordura e proteína, visto que, quanto maior os teores de gordura nos grãos, menor tenderá ser o percentual de proteína bruta, como observado na análise de heatmap do grupo G1. Os teores de amido teve uma relação negativa com a proteína bruta, ou seja, quanto menores os teores de proteína, maiores foram os percentuais de amido.

Figura 11 – Rede de correlações de Pearson entre as variáveis avaliadas no experimento.



Variáveis correlacionadas de forma positiva são conectadas por linhas verdes, enquanto linhas vermelhas unem variáveis negativamente correlacionadas. A espessura da linha é proporcional à magnitude da correlação. WC: teor de água, IC: renda, YD: rendimento, ASM: massa específica, BRO: grãos quebrados, DM: grãos defeituosos, CH: grãos gessados, CP: proteína, ST: amido, FAT: gordura, AS: cinzas, CF: fibras.  
Fonte: Autor.

## 6 CONCLUSÃO

Durante o carregamento do silo armazenador com fluxo de ar de secagem identificou-se redução de vazão do ar e a vazão específica do ar, conforme é realizado o carregamento do silo, enquanto que a pressão estática é aumentada. Para manter as recomendações técnicas de fluxo de ar e garantir a correta secagem dos grãos, a simulação revelou que o recomendado do enchimento é 32% do silo armazenador com fluxo de ar de secagem.

Os silos em que não foi realizado o processo completo de limpeza de retificação, obtiveram redução na pressão estática, possibilitando maior saída do ar em pontos específicos, interferindo na distribuição do ar e na secagem, visto que pontos superiores da massa de grãos não houve, praticamente, fluxo de ar.

Ao observar a influência da relação do teor de água e impureza dos grãos armazenados, a relação 19U/1,5I, com o menor percentual de impurezas e maior teor de água, apresentou maior rendimento, bem como menor quantidade de grãos com defeitos, quebrados e gessados. Entretanto, foi possível identificar que a camada inferior do silo armazenador com fluxo de ar de secagem neste tratamento teve a qualidade física dos grãos prejudicada, pela alta temperatura, formando a frente de secagem, essa mesma observação ocorreu nos silos com as relações 18U/2,0I e 17U/2,5I.

O amido, principal componente do arroz, em todos os experimentos e pontos do silo armazenador com fluxo de ar de secagem apresentou níveis menores que o esperado para o arroz polido. Porém, o experimento possibilitou identificar que grãos de arroz com o teor elevado de amido possui a formação de fissuras na superfície, ao analisa-los através de MEV. No entanto, o teor de amido não apresentou relação direta com o índice de cristalinidade.

Concluiu-se que o sistema de secagem de arroz em casca em silo armazenador com fluxo de ar para secagem é uma boa alternativa, alcançando resultados satisfatórios de qualidade de grãos, desde que haja controle e manejos adequados dos lotes de grãos recebidos, na uniformidade em teores de água e teores de impurezas.

## REFERÊNCIAS

- ATUNGULU, G. G.; KOLB, R. E.; KARCHER, J.; SHAD, Z. M. Postharvest technology: rice storage and cooling conservation. **Rice: Chemistry and Technology**, v. 4, p. 517-555, 2019.
- ATUNGULU, G. G.; SADAKA, S. Postharvest technology: rice drying. **Rice: Chemistry and Technology**, v. 4, p. 473-515, 2019.
- BALINDONG, J. L.; WARD, R. M.; LIU, L.; ROSE, T. J.; PALLAS, L. A.; OVENDEN, B. W.; SNELL, P. J.; WATERS, D. L. E. Rice grain protein composition influences instrumental measures of rice cooking and eating quality. **Journal of Cereal Science**, v. 79, p. 35-42, 2018.
- BAO, J. **Genes and QTLs for Rice Grain Quality Improvement**, Rice - Germplasm, Genetics and Improvement, Dr. Wengui Yan (Ed.), InTech, 2014.
- BAO, J.; KONG, X.; XIE, J.; XU, L. Analysis of genotypic and environmental effects on rice starch. 1. Apparent amylose content, pasting viscosity, and gel texture. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 52, p. 6010–6016, 2004.
- BARTOSIK, R.; MAIER, D. Effect of airflow distribution on the performance of NA/LT in-bin drying of corn. **Transactions of the ASABE**, v. 49, n. 4, p. 1095-1104, 2006.
- BINELO, M.; FAORO, V.; KATHATOURIAN, O. A.; ZIGANSHIN, B. Airflow simulation and inlet pressure profile optimization of a grain storage bin aeration system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 164, 104923, 2019.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa Nº 6 de 16 de fevereiro de 2009. **Regulamento Técnico do Arroz**. Brasília, DF, 2009.
- CHENG, A.; ISMAIL, I.; OSMAN, M.; HASHIM, H. Mapping of quantitative trait loci for aroma, amylose content and cooked grain elongation traits in rice. **Plant Omics Journal**, v. 7, n. 3, p. 152–157, 2014.
- CHENG, X.; ZHANG, Q.; YAN, X.; SHI, C. Compressibility and equivalent bulk modulus of shelled corn. **Biosystems Engineering**, v. 140, p. 91-97, 2015.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – Conab. **A Cultura do arroz**. Brasília: Conab, 2015. 180 p.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – Conab. **Levantamento de safras**. v. 6, n. 5, 2019, 69 p.
- CORADI, P. C. **Secagem e armazenagem de grãos de soja em silo armazenador com fluxo de ar para secagem aerador**. Mauritius: Novas Edições Acadêmicas, 2018. 89 p.
- CORADI, P. C.; FERNANDES, C. H. P.; HELMICH, J. C.; GONELI, A. L. D. Effects of drying air temperature and grain initial moisture content on soybean quality (*Glycine Max* (L.) Merrill). **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 5, p. 866-876, 2016.

- CORADI, P. C.; MELO, E. C.; ROCHA, R. P. Evaluation of electrical conductivity as a quality parameter of lemongrass leaves (*Cymbopogon Citratus Stapf*) submitted to drying process. **Drying Technology**, v. 32, n. 8, p. 969-980, 2014.
- CORADI, P. C.; MILANE, L. V.; CAMILO, L. J.; PRADO, R. L. F.; FERNANDES, T. C. Qualidade de grãos de soja armazenados em baixas temperaturas. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 9, n. 3, p. 197-208, 2015.
- CORADI, P. C.; NUNES, M. T.; DUTRA, A. P.; SOUZA, G. A. C. DE; CARNEIRO, L. O.; STEINHAUS, J. I. Evaluation of the operating system of a storage unit for drying silos and the quality of rice grains. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, e235997073, 2020.
- DILLAHUNTY, A., SIEBENMORGEN, T., MAUROMOUSTAKOS, A. Effect of temperature, exposure duration, and moisture content on color and viscosity of rice. **Cereal Chemistry**, v. 78, n. 5, p. 559-563, 2001.
- DIONELLO, R. G.; RADÜNZ, L. L.; CONRAD, V. J. D.; LUCCA, F. O.; ELIAS, M. C. Temperatura do ar na secagem estacionária e tempo de armazenamento na qualidade de grãos de milho. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 6, n. 2, p. 137-143, 2000.
- EICHOL, E. D.; PERES, W. B. Monitoramento da qualidade física de secagem de sementes de milho em secadores estacionários. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 30, n. 2, p. 57-64, 2008.
- EIRAS, D. L.; BIAGIONNI, M. A. M. Perda de matéria seca em grãos de milho submetidos a sistemas de secagem natural e artificial. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 29, n. 3, p. 228-235, 2014.
- ELIAS, M. C. **Pós-colheita de arroz: secagem, armazenamento e qualidade**. 1ª ed. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária UFPEL, v.1, 2007, 424 p.
- ELIAS, M. C.; LOECK, A. E.; BARBOSA, F. F.; GRUTZMACHER, D. D. **Recomendações técnicas para colheita, armazenamento e industrialização do arroz para o Sul do Brasil**. FAEM–DCTA, 2000, Pelotas.
- ELIAS, M. C.; LOPES, V.; GUTKOSKI, L. C.; OLIVEIRA, M.; MAZZUTTI, S.; DIAS, A. R. G. Umidade de colheita, métodos de secagem e tempo de armazenamento na qualidade tecnológica de grãos de trigo (cv. ‘Embrapa 16’). **Ciência Rural**, v. 39, n. 1, p. 25-30, 2009.
- ELIAS, M.C. **Manejo tecnológico da secagem e do armazenamento de grãos**. Pelotas: Ed. Santa Cruz, 2008. 367p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Cultivo do Arroz Irrigado no Brasil**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2005, 270 p.
- FAGUNDES, C. A. A.; ELIAS, M. C.; BARBOSA, F. F. Desempenho industrial de arroz secado com ar aquecido por queima de lenha e de GLP. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 30, p. 8-15, 2005.

FARIA, S. A. S. C.; BASSINELLO, P. Z.; PENTEADO, M. V. C. Nutritional composition of rice bran submitted to diferente stabilization procedures. **Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 48, n. 4, p. 651-657, 2012.

FARONI, L. R. D.; BARBOSA, G. N. O.; SARTORI, M. A.; CARDOSO, F. S.; ALENCAR, E. R.; Avaliação qualitativa e quantitativa do milho em diferentes condições de armazenamento. **Engenharia na Agricultura**, v.13, p.193-201, 2005.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Statistics, 2019**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#home>>. Acesso em: Abr. 2021.

GOLMOHAMMADI, M.; FOROUGH-DAHR, M.; RAJABI-HAMANEH, M.; SHOJAMORADI, A. R.; HASHEMI, S. J. Study on drying kinetics of paddy rice: Intermittent drying. **Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering**, v. 35, n.3, p. 105-117, 2016.

GOMES, A. S.; MAGALHÃES JUNIOR, A. M. **Arroz Irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informação, 2004. 899 p.

GUIMARÃES, D.S.; LUZ, C.A.S.; PERES, W.B.; LUZ, M.L.G.S.; GADOTTI, G.I. **Secagem de grãos e sementes**. 1. ed. Pelotas: Santa Cruz, 2015. 314p.

HAMPEL, N.; LE, K. H.; KHARAGHANI, A.; TSOTSAS, E. Continuous modeling of superheated steam drying of single rice grains. **Drying Technology**, v. 37, n. 12, p. 1583-1596, 2019.

HAQ, R.; WANI, M.; PRASAD, K. Engineering properties of high and low altitude rice varieties from Kashmir valley at diferente processing levels. **Cogent Food & Agriculture**, v. 2, p. 1-11, 1133371, 2016.

HOELTZ, M.; FAGUNDES, C. A.; ALCAYAGA, E. A. L.; NOLL, I. B. Micobiota e micotoxinas em amostras de arroz coletadas durante o sistema estacionário de secagem e armazenamento. **Ciência Rural**, v. 39, n. 3, p. 803-808, 2009.

IGATHINATHANE, C.; CHATTOPADHYAY, P. K.; PORDESIMO, L. O. Moisture diffusion modelling of parboiled paddy accelerated tempering process with extended application to multi-pass drying simulation. **Journal of Food Engineering**, v. 88, n. 2, p. 239–53, 2008.

JIAN, F.; JAYAS, D. S. The ecosystem approach to grain storage. **Agricultural Research**, v. 1, n. 2, p. 148-156, 2012.

JULIANO, B. O.; BECHTEL, D. B. **The rice grain and its gross composition**. In: JULIANO, B.O. (Ed.). Rice: chemistry and technology. Minnesota: American Association of Cereal Chemists, 1985. Cap.2, p.17-57.

KAMINSKI, T. A., BRACKMANN, A.; SILVA, L. P. DA; NICOLETTI, A. M.; ROBERTO, B. S. Changes in culinary, viscoamylographic and sensory characteristics during rice storage at different temperatures. **Journal of Stored Products Research**, v. 53, p. 37-42, 2013.

KHATCHATOURIAN, O. A.; BINELO, M. O. Simulation of threedimensional airflow in grain storage bins. **Biosystems Engineering**, v. 101, n. 2, p. 225-238, 2008.

KHATCHATOURIAN, O. A.; SAVICKI, D. L. Mathematical modelling of airflow in na aerated soya bean stored under non-uniform conditions. **Biosystems Engineering**, v. 88, p. 201-211, 2004.

KOLPAKOVA, V. V.; CHUMIKINA, L. V.; ARABOVA, L. I. Modification of functional properties of white and brown rice protein concentrates. **Vestnik Voronežskogo Gosudarstvennogo Universiteta Inženernyh Tehnologij**, v. 81, n. 1, p. 181-189, 2019.

KUMAR, D.; KALITA, P. Reducing postharvest losses during storage of grain crops to strengthen food security in developing countries. **Foods**, v. 6, n. 8, p. 1-22, 2017.

KUMORO, A. C.; LUKIWATI, D. R.; PRASEPTIANGGA, D.; DJAENI, M.; RATNAWATI, R.; HIDAYAT, J. P.; UTARI, F. F. Effect of bed thickness on the drying rate of paddy rice in an up-flow fixed bed dryer. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1376, 012045, 2019.

LANG, G. H.; LINDEMANN, I. S.; FERREIRA, C. D.; POHNDORF, R. S.; VANIER, N. L.; OLIVEIRA, M. DE. Influence of drying temperature on the structural and cooking quality properties of black rice. **Cereal Chemistry**, v. 95, p. 564-574, 2018.

LANG, G. H.; LINDEMANN, I. S.; GOEBEL, J. T.; FERREIRA, C. D.; ACUNHA, T. S.; OLIVEIRA, M. DE. Fluidized-bed drying of black rice grains: Impact on cooking properties, in vitro starch digestibility, and bioaccessibility of phenolic compounds. **Journal of Food Science**, v. 85, n. 6, p. 1717-1724, 2020.

MATSUO, M.; KAWAMURA, S.; KATO, M.; DIAZ, E. O.; KOSEKI, S. Practical application of near-infrared spectroscopy for determining rice amylose content at grain elevator. **Arid Zone Journal Of Engineering, Technology & Environment**, v.14, p.95-100, 2018.

MCLEAN, J. L.; DAWE, D. C.; HARDY, B.; HETTEL, G. P. **Rice almanac**: source book for the most important economic activity on earth. 3 ed. Los Baños: IRRI, 2002. p. 298.

MENEGHETTI, V. L.; AOSANI, E.; ROCHA, J. C. DA; OLIVEIRA, M. DE; ELIAS, M. C.; POHNDORF, R. S. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 10, p. 1115-1120, 2012.

MENEZES, L.L. DE; PASQUALLI, L. L.; BARBIERI, A. P. P.; VIDAL, M. D.; CONCEIÇÃO, G. M. Temperaturas de secagem na integridade física, qualidade fisiológica e composição química de sementes de arroz. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 4, p. 430-436, 2012.

MILLATI, A.R.M.; AKBAR, S.; SUSI, A. Rahmi Changes in rice chemical composition and cooking quality by respiration heat during storage. **Journal Of Wetlands Environmental Management**, v. 5, p. 43-52, 2017.

MILMAN, M. J. **Equipamentos para Pré-Processamento de Grãos**. Editora e Gráfica Universitária UFPEL: Pelotas, 2002, 206 p.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA, INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS. **Comex Vis: Principais Produtos Exportados.** Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/comercio-externo/estatisticas-de-comercio-externo/comex-vis/frame-ppe?ppe=1041>>. Acesso em: Abr., 2021.

MONTANUCI, F. D.; CAVALCANTE, R. M.; PERUSSELLO, C. P.; JORGE, L. M. L. Comparison of drying kinetics of maize in oven and in pilot silo dryer: influence on moisture content and physical characteristics. **International Journal of Food Engineering**, v. 12, n. 6, p. 599-606, 2016.

MUTUNGI, C.; MUTHONI, F.; BEKUNDA, M.; GASPAR, A.; KABULA, E. Physical quality of maize grain harvested and stored by smallholder farmers in the Northern highlands of Tanzania: Effects of harvesting and pre-storage handling practices in two marginally contrasting agro-locations. **Journal of Stored Products Research**, v. 84, p. 1-12, 2019.

NAGHAVI, Z.; MOHEB, A.; ZIAEI-RAD, S. Numerical simulation of rough rice drying in a deep-bed dryer using non-equilibrium model. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 2, p. 258-264, 2010.

OLATUNDE, G.; ATUNGULU, G. G. Potential of turbulence interference in rough rice bin drying and storage systems fitted with cabling technology. **Biosystems Engineering**, v. 163, p. 1-14, 2017.

OLATUNDE, G.; ATUNGULU, G. G.; SADAKA, S. CFD modeling of air flow distribution in rice bin storage system with different grain mass configurations. **Biosystems Engineering**, v. 151, p.286-297, 2016.

OLIVEIRA, F. A.; KHATCHATOURIAN, O. A.; BIHAIN, A. Estado térmico de produtos armazenados em silos com sistema de aeração: Estudo teórico e experimental. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 1, p. 247-258, 2007.

PARK, I.; PARK, J-D.; LEE, H-Y.; KUM, J-S. Effects of air, microwave, and microvacuum drying on brown rice quality. **Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry**, v. 55, p. 523-528, 2012.

PEREZ, J. H.; TANAKA, F.; TANAKA, F.; HAMANAKA, D.; UCHINO, T. Three-dimensional numerical modeling of convective heat transfer during shallow-depth forced-air drying of brown rice grains. **Drying Technology**, v. 33, p. 1350-1359, 2015.

PESKE, S. T.; ROSENTHAL, M. D.; ROTA, G. R. M. **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos**. 1 ed. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária, 2003, 415p.

PORTELLA, J. A.; EICHELBERGER, L. **Secagem de grãos**. Passo Fundo: EMBRAPA Trigo, 194p, 2001.

PRASAD, K.; VAIRAGAR, P. R.; BERA, M. B. Temperature dependent hydration kinetics of Cicer arietinum splits. **Food Research International**, v. 43, n. 2, p. 483-488, 2010.

PUZZI, D. **Abastecimento e armazenamento de grãos**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986. 603p.

RAMOS, A. H.; ROCKENBACH, B. A.; FERREIRA, C. D.; GUTKOSKI, L. C; OLIVEIRA, M. Characteristics of flour and starch isolated from red rice subjected to different drying conditions. **Starch/Stärke**, v. 71, 1800257, 2019.

RENIANA; BINTORO, N.; NUGROHO, J. Analysis of aeration system on paddy storage in silos using Computational Fluid Dynamics (CFD). **Jurnal Keteknik Pertanian**, v. 5, n. 2, p. 187-194, 2017.

RESENDE, O.; CORREA, P. C.; GONELLI, A. L. D.; RIBEIRO, D. M. Propriedades físicas de feijão durante a secagem: determinação e modelagem. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 1, p. 225-230, 2008.

ROCHA, J. C. DA; POHNDORF, R. S.; MENEGHETTI, V. L.; OLIVEIRA, M. DE; ELIAS, M. C. Effects of mass compaction on airflow resistance through paddy rice grains. **Biosystems Engineering**, v. 194, p. 28-39, 2020.

RUIZ, A. W.; NESS, A. R. Qualidade do arroz em casca seco e armazenado em mini silos metálicos em aeração controlada. **Engenharia na Agricultura**, v. 9, n. 1, p. 35-54, 2001.

SAMPAIO, C. P.; NOGUEIRA, R. M.; ROBERTO, C. D.; SILVA, J. S. Development of a dryer with airflow reversal and a pneumatic system for grain movement. **Biosystems Engineering**, v. 98, p. 33-38, 2007.

SANTOS, N. C.; SILVA, W. P.; BARROS, S. L.; ARAÚJO, A. J. B.; GOMES, J. P.; ALMEIDA, R. L. J.; NASCIMENTO, A. P. S.; ALMEIDA, R. D.; SILVA, C. M. D. P. S.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIREDO, R. M. F. Study on drying of black rice (*oryza sativa* L.) Grains: physical-chemical and bioactive quality. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 9, p. 203-212, 2019.

SCARIOT, M. A.; KARLINSKI, L.; DIONELLO, R. G.; RADÜNZ, A. L.; RADÜNZ, L. L. Effect of drying air temperature and storage on industrial and chemical quality of rice grains. **Journal of Stored Products Research**, v. 89, 101717, 2020.

SHAFIEKHANI, S.; WILSON, S. A.; ATUNGULU, G. G. Impacts of storage temperature and rice moisture content on color characteristics of rice from fields with different disease management practices. **Journal of Stored Products Research**, v. 78, p. 89-97, 2018.

SHEPELEV, V.; SHEPELEV, S.; ALMETOVA, Z. Method of justification of the grain cleaning assembly performance. **Research in Agricultural Engineering**, v. 64, n. 4, p. 115-120, 2018.

SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L.; NOGUEIRA, R. M. **Secagem e Secadores**. Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas, Cap. 5 2008.

SILVA, L. C. **Secagem de Grãos**. Boletim técnico: AG: 04/05 em 29/03/2005, Universidade Federal do Espírito Santo, 2005.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO – SOSBAI. **Arroz irrigado: Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil.** In: XXXII REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, Farroupilha. 2018. 205 p.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO – SOSBAI. Importância do arroz. In: REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO, 30<sup>a</sup>, 2014, Bento Gonçalves. **Anais...** Santa Maria: SOSBAI, 2014. p. 9-13.

STORCK, C. R.; SILVA, L. P. DA; FAGUNDES, C. A. A. Categorizing rice cultivars based on differences in chemical composition. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 18, p. 333-341, 2005.

TANG, E. N.; NDINDENG, S. A.; BIGOGA, J.; TRAORE, K.; SILUE, D.; FUTAKUCHI, K. Mycotoxin concentrations in rice from three climatic locations in Africa as affected by grain quality, production site, and storage duration. **Food Science & Nutrition**, v. 7, p. 1274-1287, 2019.

TRUONG, T.; TRUONG, V.; FUKAI, S.; BHANDARI, D. Changes in physicochemical properties of rice in response to high-temperature fluidized bed drying and tempering. **Drying Technology**, v. 37, n. 3, p. 331-340, 2019.

TUMPANUVATR, T.; JITTANIT, W.; SUROJANAMETAKUL, V. Study of hybrid dryer prototype and its application in pregerminated rough rice drying. **Drying Technology**, v. 36, n. 2, p. 205-220, 2018.

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. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 59, n. 3, p. 1029-1038, 2016.

WALTER, M.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L. A. Arroz: composição e características nutricionais. **Ciência Rural**, v. 38, n. 4, p. 1184-1192, 2008.

WANG, y.; DUAN, H.; ZHANG, H.; FANG, Z. Modeling on heat and mass transfer in stored wheat during forced cooling ventilation. **Journal Thermal Science**, v. 19, n. 2, p. 167–172, 2010.

WISET, L.; SRZEDNICKI, G.; DRISCOLL, R. H.; NIMMUNTAVIN, C.; SIWAPORNRAK, P. Effects of high temperature drying on rice quality. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*, v. 3, 2001.

YOSHIOKA, Y.; IWATA, H.; TABATA, M.; NINOMIYA, S.; OHSAWA, R. Chalkiness in rice: potential for evaluation with image analysis. **Crop Science**, v. 47, n. 5, p. 2113-2120, 2007.

YU, X-R.; ZHOU, L.; XIONG, F.; WANG, Z. Structural and histochemical characterization of developing rice caryopsis. **Rice Science**, v. 21, n. 3, p. 142-149, 2014.

ZHOU, Z.; ROBARDS, K.; HELLIWELL, S.; BLANCHARD, C. Ageing of stored rice: changes in chemical and physical attributes. **Journal of Cereal Science**, v. 35, p. 65-78, 2002a.

ZHOU, Z.; ROBARDS, K.; HELLIWELL, S.; BLANCHARD, C. Composition and functional properties of rice. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 37, p.849-868, 2002b.