

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CENTRO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO “STRICTO SENSU” EM
ENGENHARIA QUÍMICA – NÍVEL DE MESTRADO

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DE CÂMARA
GRAVITACIONAL PARA SEPARAÇÃO MECÂNICA DAS
IMPUREZAS PRESENTES NO TRIGO RECÉM COLHIDO**

Fabiane Luiza Corbari

TOLEDO – PR - BRASIL

Março de 2020

FABIANE LUIZA CORBARI

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DE CÂMARA
GRAVITACIONAL PARA SEPARAÇÃO MECÂNICA DAS
IMPUREZAS PRESENTES NO TRIGO RECÉM COLHIDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Processos Químicos e Bioquímicos.

Orientadora: Professora Dra. Márcia Teresinha Veit.

TOLEDO – PR - BRASIL

Março de 2020

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Corbari, Fabiane Luiza

Desenvolvimento de um módulo de câmara gravitacional para a separação mecânica das impurezas presentes no trigo recém colhido / Fabiane Luiza Corbari; orientador(a), Márcia Teresinha Veit, 2020.

95 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Toledo, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2020.

1. Planejamento experimental. 2. Matriz de Doehlert. 3. Câmara de poeira. 4. Pré-limpeza de trigo. I. Veit, Márcia Teresinha. II. Título.

Agradecimentos

Aos meus pais, Moacir Corbari e Claudilete Corbari, que sempre me apoiaram e ensinaram que a educação é mais valiosa que qualquer bem material.

A minha irmã, Ana Laura Corbari, que sempre esteve disposta a me ouvir nos momentos de crise.

Ao Bruno de Souza Herdina que muitas vezes acreditou mais em mim do que eu mesma.

Aos meus amigos que nos momentos de cansaço me ajudaram a clarear a mente, para que eu pudesse me manter perseverante.

A minha orientadora, Professora Dra. Márcia Teresinha Veit, que desde quando este projeto era apenas uma ideia em uma folha de rascunho acreditou nele e se dispôs a me guiar em todas as etapas do caminho.

A UNIOESTE e seus Docentes, que me proporcionaram uma educação de qualidade desde a graduação.

A todos os que de alguma forma contribuíram para que este projeto fosse realizado.

A Deus por me presentear com saúde, me rodear de pessoas especiais e me proporcionar as ferramentas para buscar meus sonhos.

Sou extremamente grata.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Não há maior sinal de loucura do que fazer uma coisa repetidamente e esperar a cada vez um resultado diferente”.

Albert Einstein

Índice

1.	Introdução	1
2.	Objetivo geral	3
2.1	Objetivos Específicos	3
3.	Revisão Bibliográfica	4
3.1	A cultura do trigo	4
3.2	Equipamentos de pré-limpeza.....	6
3.3	Propriedades de partículas sólidas	8
3.4	Fluidodinâmica de partículas sólidas	10
3.4.1	Influência da presença de fronteiras rígidas	12
3.4.2	Influência da concentração de partículas.....	13
3.5	Separação de materiais.....	14
3.5.1	Separações mecânicas	14
3.5.2	Câmaras gravitacionais.....	16
3.6	Análise e modelagem de processos	19
3.7	Simulação de processos	20
3.7.1	Utilização do Visual Basic (VBA) na simulação de processos	22
3.8	Tratamento estatístico de dados	22
3.9	Planejamento experimental.....	23
3.10	Estado da arte	26
4.	Metodologia.....	28
4.1	Caracterização do Grão de Trigo	28
4.2	Simulação do processo de separação	28
4.3	Construção e teste do módulo de separação experimental de bancada.....	29
4.4	Construção e teste do protótipo de separação construído em escala piloto	32
5.	Resultados.....	36
5.1	Caracterização do Grão de Trigo	36
5.2	Simulação das condições operacionais do processo de separação para estimar os valores das variáveis de projeto do módulo experimental de bancada.....	38
5.3	Módulo experimental de bancada	41
5.4	Problemas observados na operação do módulo experimental de bancada e melhorias aplicadas a construção do protótipo em escala piloto.....	52
5.5	Protótipo em escala piloto.....	53
6.	Conclusão	74
7.	Sugestões para Trabalhos Futuros	75

8. Referências	76
Apêndice A – Gráficos de contorno da função desejabilidade para o protótipo em escala piloto.....	79

Lista de Figuras

Figura 3.1.1: Divisão do PIB, por setores, da Cadeia Produtiva do Trigo (ABITRIGO, 2018).....	5
Figura 3.1.2: Mapa ilustrativo da distribuição percentual de moinhos de trigo por região brasileira (ABITRIGO, 2018).....	5
Figura 3.1.3: Mapa ilustrativo do número de moinhos de trigo distribuídos regionalmente no Paraná (SINDITRIGO-PR & FIEP, 2018).	6
Figura 3.3.1: Desenho esquemático do grão de trigo e suas respectivas dimensões características (CORRÊA <i>et al.</i> , 2006).....	10
Figura 3.5.1: Modelo esquemático de uma câmara gravitacional de dois estágios (GOMIDE, 1980).....	17
Figura 3.5.2: Modelo esquemático de uma câmara gravitacional de três estágios com chicanas, Corte Lateral (a) e Corte Superior (b) (MACINTYRE, 1990).	19
Figura 4.3.1: Módulo experimental de bancada utilizado na separação de grãos e impurezas e suas estruturas constituintes (Fonte: o autor).....	30
Figura 4.4.1: (a) Desenho esquemático do projeto da estrutura metálica do protótipo em escala piloto no SolidWorks. (b) Vista com corte lateral do projeto da estrutura metálica do protótipo em escala piloto. (c) Desenho esquemático da válvula borboleta, utilizada para controle de vazão de grãos na alimentação (Fonte: o autor).	32
Figura 4.4.2: Protótipo de câmara gravitacional utilizado na separação de impurezas e grãos de trigo, construído em escala piloto (Fonte: o autor).	34
Figura 5.2.1: Interface de simulação VBA utilizada para estimar/calcular os valores das variáveis de projeto do módulo experimental de bancada em diferentes condições operacionais. (Fonte: o autor).....	39
Figura 5.2.2: Compilado dos valores das dimensões de câmara gravitacional em função da temperatura, obtidas a partir da simulação do processo de separação, para as vazões de 0,0108 (a) e 0,0139 (b) $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, respectivamente.	40
Figura 5.3.1: Valores percentuais médios de perda e impureza em função da massa de grãos de trigo obtidos a partir de testes preliminares com o módulo experimental de bancada, na vazão de ar de 0,0108 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ e temperatura de 20 °C.	41
Figura 5.3.2: Diagrama de Pareto para a variável resposta percentual de impureza obtido a partir dos dados aferidos nos testes com o módulo experimental de bancada.	44
Figura 5.3.3: Diagrama de Pareto para a variável resposta percentual de perda obtido a partir dos dados aferidos nos testes com o módulo experimental de bancada.	45
Figura 5.3.4: Relação entre os valores preditos pelo modelo e os valores obtidos experimentalmente, nos testes com o módulo experimental de bancada para o percentual de: a) impureza e b) perda.	47
Figura 5.3.5: (a) Relação de Normalidade dos resíduos do percentual de impureza, obtida a partir dos testes com o módulo experimental de bancada; (b) Resíduos de percentual de impureza distribuídos de acordo com a ordem observada experimentalmente, obtidos a partir dos testes com o módulo experimental de bancada.	48
Figura 5.3.6: (a) Relação de Normalidade dos resíduos do percentual de perda, obtida a partir dos testes com o módulo experimental de bancada; (b) Resíduos de percentual de perda distribuídos de acordo com a ordem observada experimentalmente, obtidos a partir dos testes com o módulo experimental de bancada.	48

Figura 5.3.7: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de impureza, massa grãos e abertura de alimentação, obtidas com base nos testes com o módulo experimental de bancada.	49
Figura 5.3.8: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de perda, massa grãos e abertura de alimentação, obtidas com base nos testes com o módulo experimental de bancada.	49
Figura 5.3.9: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas para a função Desejabilidade Global, com base na interação entre as variáveis percentual de impureza e percentual de perda, obtidas a partir dos testes com o módulo experimental de bancada. .	50
Figura 5.3.10: Condições de operação (valores de massa de grãos e abertura de alimentação) do módulo experimental de bancada que minimizam o percentual de perda e o percentual de impureza no processo de separação.	51
Figura 5.5.1: Diagrama de Pareto para a variável resposta percentual de impureza obtido a partir dos dados aferidos nos testes com o protótipo em escala piloto.	59
Figura 5.5.2: Diagrama de Pareto para a variável resposta percentual de perda obtido a partir dos dados aferidos nos testes com o protótipo em escala piloto.	60
Figura 5.5.3: Diagrama de Pareto para a variável resposta percentual de acúmulo obtido a partir dos dados aferidos nos testes com o protótipo em escala piloto.	61
Figura 5.5.4: Relação entre os valores preditos pelo modelo e os valores obtidos experimentalmente nos testes com o protótipo em escala piloto para o percentual de: a) impureza; b) perda e c) acúmulo.	63
Figura 5.5.5: (a) Relação de Normalidade dos resíduos do percentual de impureza, obtida a partir dos testes com o protótipo em escala piloto; (b) Resíduos de percentual de impureza distribuídos de acordo com a ordem observada experimentalmente, obtidos a partir dos testes com o protótipo em escala piloto.	64
Figura 5.5.6: (a) Relação de Normalidade dos resíduos do percentual de perda, obtida a partir dos testes com o protótipo em escala piloto; (b) Resíduos de percentual de perda distribuídos de acordo com a ordem observada experimentalmente, obtidos a partir dos testes com o protótipo em escala piloto.	64
Figura 5.5.7: (a) Relação de Normalidade dos resíduos do percentual de acúmulo, obtida a partir dos testes com o protótipo em escala piloto; (b) Resíduos de percentual de acúmulo distribuídos de acordo com a ordem observada experimentalmente, obtidos a partir dos testes com o protótipo em escala piloto.	65
Figura 5.5.8: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de impureza, massa de grãos e abertura de alimentação, obtidas com base nos testes com o protótipo em escala piloto.	66
Figura 5.5.9: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de impureza, velocidade do ar e abertura de alimentação, obtidas com base nos testes com o protótipo em escala piloto.	66
Figura 5.5.10: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de impureza, massa de grãos e velocidade do ar, obtidas com base nos testes com o protótipo em escala piloto.	67
Figura 5.5.11: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de perda, massa de grãos e abertura de alimentação, obtidas com base nos testes com o protótipo em escala piloto.	67

Figura 5.5.12: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de perda, velocidade do ar e abertura de alimentação, obtidas com base nos testes com o protótipo em escala piloto.	68
Figura 5.5.13: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de perda, massa grãos e velocidade do ar, obtidas com base nos testes com o protótipo em escala piloto.	68
Figura 5.5.14: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de acúmulo, massa de grãos e abertura de alimentação, obtidas com base nos testes com o protótipo em escala piloto.	69
Figura 5.5.15: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de acúmulo, velocidade do ar e abertura de alimentação, obtidas com base nos testes com o protótipo em escala piloto.	69
Figura 5.5.16: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de acúmulo, massa de grãos e velocidade do ar, obtidas com base nos testes com o protótipo em escala piloto.	70
Figura 5.5.17: Superfícies de resposta ajustadas para a função Desejabilidade Global, com base na interação entre as variáveis percentual de impureza, percentual de perda e percentual de acúmulo, obtidas a partir dos testes com o protótipo em escala piloto.	71
Figura 5.5.18: Condições de operação (valores de massa de grãos, velocidade do ar e abertura de alimentação) do protótipo em escala piloto que minimizam o percentual de impureza, perda e acúmulo no processo de separação.	72
Figura A1: Superfícies de contorno ajustadas para a função Desejabilidade Global, com base na interação entre as variáveis percentual de impureza, percentual de perda e percentual de acúmulo, obtidas a partir dos testes com o protótipo em escala piloto.	79

Lista de Tabelas

Tabela 4.3.1: Níveis codificados e valores reais de cada variável independente utilizados no planejamento experimental por matriz de Doehlert do módulo de separação experimental de bancada.	31
Tabela 4.4.1: Níveis codificados e valores reais de cada variável independente utilizados no planejamento experimental por matriz de Doehlert do protótipo de separação construído em escala piloto.	35
Tabela 5.1.1: Dimensões a, b e c dos eixos ortogonais dos grãos de trigo e suas respectivas médias comparados às dimensões aferidas em estudos na literatura para diferentes cultivares e diferentes teores de umidade de grãos.	36
Tabela 5.1.2: Valores de volume, densidade, esfericidade e diâmetro equivalente de grão, obtidos por meio da técnica de picnometria, comparados aos valores destas mesmas variáveis obtidos em estudos na literatura para diferentes cultivares e diferentes teores de umidade de grãos.	37
Tabela 5.3.1: Valores reais e codificados da matriz de Doehlert e percentuais de impureza e perda avaliados no planejamento experimental dos testes efetuados com o módulo experimental de bancada.	42
Tabela 5.3.2: Análise de variância (ANOVA) para o percentual de impureza e perda de grãos obtida a partir dos dados aferidos nos testes com o módulo experimental de bancada.	43
Tabela 5.3.3: Efeitos da variável resposta percentual de impureza obtidos a partir dos dados aferidos nos testes com o módulo experimental de bancada.	44
Tabela 5.3.4: Efeitos da variável resposta percentual de perda obtidos a partir dos dados aferidos nos testes com o módulo experimental de bancada.	45
Tabela 5.5.1: Valores reais e codificados da matriz de Doehlert e percentuais de impureza, perda e acúmulo avaliados no planejamento experimental dos testes efetuados com o protótipo em escala piloto.....	54
Tabela 5.5.2: Análise de variância (ANOVA) para percentual de impureza restante nos grãos após a separação, perda de grãos e acúmulo no interior do equipamento, obtida a partir dos dados aferidos nos testes com o protótipo em escala piloto.	56
Tabela 5.5.3: Análise de variância (ANOVA) para o percentual de impureza após a retirada das variáveis menos significativas, baseada nos dados aferidos nos testes com o protótipo em escala piloto.	58
Tabela 5.5.4: Efeitos da variável resposta percentual de impureza obtidos a partir dos dados aferidos nos testes com o protótipo em escala piloto.	58
Tabela 5.5.5: Efeitos da variável resposta percentual de perda obtidos a partir dos dados aferidos nos testes com o protótipo em escala piloto.	59
Tabela 5.5.6: Efeitos da variável resposta percentual de acúmulo obtidos a partir dos dados aferidos nos testes com o protótipo em escala piloto.	60

Lista de Abreviações

AA: Abertura de Alimentação

ANOVA: Análise de Variância

ABITRIGO: Associação Brasileira da Indústria do Trigo

CNPJ: Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica

DCCR: Planejamento Composto Central Rotacional

FAO: *Food and Agriculture Organization* (Organização de Agricultura e Alimento)

Fcalc: F Calculado

FIEP: Federação das Indústrias do Estado do Paraná

Ftab: F Tabelado

GL: Graus de Liberdade

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia Estatística

MD: Matriz de Doehlert

MG: Massa de Grãos

MQ: Média Quadrática

ONU: Organização das Nações Unidas

PIB: Produto Interno Bruto

PBB: Planejamento de Box Behnken

RSM: Metodologia de Superfície de resposta

SQ: Soma Quadrática

V: Velocidade do Ar

VBA: *Visual Basic*

DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DE CÂMARA GRAVITACIONAL PARA SEPARAÇÃO MECÂNICA DAS IMPUREZAS PRESENTES NO TRIGO RECÉM COLHIDO

AUTORA: FABIANE LUIZA CORBARI

ORIENTADORA: PROF. DRA. MÁRCIA TERESINHA VEIT

Dissertação de Mestrado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química; Universidade Estadual do Oeste do Paraná; Rua da Faculdade, 645; CEP: 85.903-000 – Toledo –PR, Brasil, defendida em 05 de março de 2020, 95 p.

RESUMO

No Brasil, um dos maiores produtores de trigo do mundo, a safra de 2019 foi estimada em 5,473 milhões de toneladas, 0,9% superior à da safra passada, segundo a Conab (Companhia Nacional de Abastecimento). O desenvolvimento da agricultura paranaense está intrinsecamente ligado ao incentivo à produção familiar, posto que, dentre os 350 mil produtores estimados no estado, aproximadamente 80% praticam a agricultura familiar. Neste contexto, este estudo teve por objetivo, desenvolver um projeto de sistema de pré-limpeza de grãos de trigo, voltado as necessidades do mercado consumidor de pequenos agricultores, que permita obter uma margem máxima de 1% de impureza na entrega do produto às empresas de processamento. O projeto deste equipamento abrangeu cinco etapas distintas: i) simulação das condições de operação para estimação das dimensões do equipamento em *Visual Basic* (baseada em equações de fluidodinâmica de partículas e de projeto propostas para câmaras de poeira); ii) construção e teste de um módulo experimental de bancada; iii) otimização das condições de operação do módulo experimental de bancada com base no planejamento experimental de Doehlert e função desejabilidade; iv) construção e teste de um protótipo em escala piloto, e; v) otimização das condições de operação do protótipo em escala piloto com base no planejamento experimental de Doehlert e função desejabilidade. Os testes comprovaram a eficácia do processo de separação proposto, tanto em se tratando do módulo experimental de bancada, em que o percentual máximo de impureza aferido nos grãos foi de 0,28% ao final do processo, quanto em se tratando do protótipo em escala piloto em que o percentual máximo de impureza aferido durante os testes foi de 0,29%. Através do planejamento experimental constatou-se que, no caso do módulo experimental de bancada, as variáveis de operação massa de grãos alimentada no separador

e abertura de alimentação para o controle de vazão de grãos que minimizaram o percentual de impureza restante nos grãos, bem como, o percentual de perda causado pelo soprimento de grãos para fora do equipamento foram 340 g e 18,258 mm, respectivamente. No caso do protótipo em escala piloto, as variáveis de operação que minimizaram o percentual de impureza, perda e acúmulo de sementes dentro do equipamento foram massa de grãos de 500 g, abertura de alimentação de 59,06° e velocidade do ar de 13,132 m s⁻¹. Portanto, o equipamento proposto vem ao encontro a demanda de produtores rurais por tecnologias baratas que agreguem valor ao produto em sua comercialização, reunindo, assim, condições de comercialização.

Palavras-chave: Planejamento Experimental de Doehlert, Câmara de poeira, Pré-limpeza de trigo.

DESIGN OF A SETTLING CHAMBER PROTOTYPE TO SEPARATE NEWLY HARVESTED WHEAT FROM NON-GRAIN MATERIALS

AUTHOR: FABIANE LUIZA CORBARI

SUPERVISOR: PROF. DRA. MÁRCIA TERESINHA VEIT

Masters dissertation; Graduate Program in Chemical Engineering; Western Paraná State University; College Street, 645; ZIP Code: 85.903-000 - Toledo –PR, Brazil, Presented on the 5th of march, 2020, 95 p.

ABSTRACT

Brazil is a major wheat provider worldwide. In 2019 the production estimative for the country was 5.473 million de tons, 0.9% higher than 2018, according to Conab (National Supply Company). The development of the agriculture in Paraná state is largely dependent on family farming, since among the 350.000 farmers estimated in the area, 80% practice this type of farming. With that in mind, this study had the objective of developing a pre – cleaning system for wheat, focused on the necessities of those family farmers, capable of providing maximum ranges of 1% in mass of impurities in the delivery of the product to the wheat processing companies. The project of the equipment included five steps: i) the simulation of the operational conditions, in Visual Basic, in order to estimate the dimensions of it (which was based on particle fluid dynamics equations and project equations for the gravitational settling chambers); ii) the building and testing of an experimental model; iii) the optimization of operational conditions for the experimental model by using Doehlert's matrix and the desirability function; iv) the building and testing of prototype in pilot scale, and; v) the optimization of operational conditions for the prototype by using Doehlert's matrix and the desirability function. The testing proved the efficiency of the separation process proposed, for both, experimental model and prototype, once the maximum impurities' percentages observed among the grains at the end of the separation were 0.28 and 0.29 %, respectively. Based on the experimental design it was found that, for the experimental model, the operational variables which minimized the percentages of impurities among grains as well as the percentage of losses due to blowing out of grains from the equipment, were a feed of 340 g and an opening in the feeding door, which controlled the grain flow, of 18,258 mm. Moreover, it was also found that, for the prototype, the operational variables which minimized the percentages of impurities among grains, the percentage of losses due to

blowing out of grains from the equipment, and the accumulation of the grains in the equipment, consisted on a feed of 500 g, an opening in the feeding valve of 59.06°, and an air blowing velocity of 13,132 m s⁻¹. Therefore, the proposed equipment is suitable to the rising demand for more affordable farming technology, thus, having potential for future commercialization.

Key words: Doehlert's Experimental Design; Gravitational Settling Chamber; Wheat Pre – cleaning System.

1. Introdução

O crescimento da demanda mundial por alimentos, considerando a expectativa populacional estimada pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015 de 9,73 bilhões de pessoas, demonstra a necessidade de um aumento na produção agrícola de 48,6% até 2050 (FAO, 2017). Adicionalmente, a organização aponta algumas diferenças entre produções reais e estimadas, principalmente em países subdesenvolvidos, e atribui a este fato, entre outros motivos, a falta de adoção de tecnologias mais produtivas (FAO, 2011).

No Brasil, a agricultura e o agronegócio são partes fundamentais da economia, constituindo aproximadamente 24% do Produto Interno Bruto (PIB) em 2017, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). No Estado do Paraná, neste mesmo ano, estes setores corresponderam à 30% do PIB paranaense. Dentre os 350 mil produtores que atuam no estado, aproximadamente 80% praticam a agricultura familiar (PORTAL PARANÁ COOPERATIVO, 2018).

Logo, o desenvolvimento da agricultura paranaense está intrinsecamente ligado ao incentivo à produção familiar. Uma possibilidade de agregar valor ao produto proveniente do campo seria pelo barateamento dos sistemas de produção e pós-produção, de forma que as cargas graneleiras sejam aceitas para processamento por agroindústrias, sem a necessidade de serviços intermediários, tais como os fornecidos por unidades de limpeza de grãos.

Desta forma, o desenvolvimento de um sistema de pré-limpeza de grãos, monetariamente acessível com relação a tecnologia existente, é de interesse do mercado consumidor de pequenos agricultores, visto que, o produto provindo diretamente do campo possui impurezas, tais como, folhas, galhos, cascas, terra, etc., misturadas aos grãos colhidos.

Empresas receptoras de grãos em geral (cooperativas e agroindústrias) oferecem uma alíquota bônus sobre o valor da carga, quando esta apresenta um percentual máximo de impureza de 1% em massa. Portanto, antes de serem entregues, é conveniente que os grãos de qualquer cultura passem por um sistema de pré-limpeza, o qual tem a finalidade de reduzir a quantidade de impurezas a percentuais aceitáveis.

Atualmente, a pré-limpeza é efetuada por um equipamento composto por peneiras vibratórias, que além de causar desgaste ao operador, pois entupimentos são comuns exigindo manutenções constantes, também gera perda de produção. Essa perda de grãos é devida ao não enquadramento nos tamanhos padrões das peneiras comercializadas (*mesh*), que gera

naturalmente sua exclusão do processo. No entanto, esses grãos não classificados têm potencial de aceitação no processamento industrial. Adicionalmente, apesar de haver diferentes invenções relacionadas ao assunto de separação de impurezas de grãos, nada consta na busca realizada nos bancos de dados nacionais, como o INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial) e o NIT (Núcleo de Inovações Tecnológicas - UNIOESTE), e internacionais, como *Google Patens*, *Espacenet* e *Free Patens Online*, a respeito da adaptação e utilização de uma câmara de poeira para realizar a separação. Frente ao exposto, se constata a necessidade do desenvolvimento e estudo desta forma alternativa de processamento para esta etapa da cadeia produtiva.

2. Objetivo geral

Desenvolver um sistema de pré-limpeza de grãos de trigo voltado às necessidades do mercado consumidor de pequenos agricultores, que permita obter uma margem máxima de 1% de impureza na entrega do produto às empresas de processamento.

2.1 Objetivos Específicos

1. Desenvolver uma interface de simulação no *software Visual Basic (VBA)* baseada nos modelos matemáticos existentes de câmara gravitacional, para estimar o dimensionamento do módulo experimental em função das características das partículas a serem separadas (grãos de trigo);
2. Construir e testar um módulo experimental de bancada, para averiguar sua efetividade na separação de impurezas e grãos de trigo, bem como, para avaliar o percentual de perda de grãos;
3. Estudar a otimização das variáveis de operação do módulo experimental, massa de grãos e vazão de alimentação, em busca da minimização das variáveis resposta percentual de impurezas e percentual de perda de grãos;
4. Realizar melhorias estruturais no módulo, de forma a construir um protótipo industrial;
5. Investigar o desempenho do protótipo perante operação nas condições ótimas previamente estabelecidas no módulo experimental de bancada;
6. Estudar a otimização das variáveis de operação do protótipo, massa de grãos, vazão de alimentação e velocidade do ar, em busca da minimização das variáveis resposta percentual de impurezas e percentual de perda de grãos.

3. Revisão Bibliográfica

3.1 A cultura do trigo

Conforme dados da FAO (2019), o trigo é o terceiro cereal mais produzido no mundo, perdendo apenas para o arroz e o milho. Esta gramínea é originária da região conhecida como o “Crescente Fértil”, que abrange o norte do Nilo até o Iraque e Kuwait. No Brasil, o trigo foi cultivado desde o início da colonização, mesmo que nem sempre para fins comerciais. Iniciativas tanto do governo quanto dos imigrantes em importar sementes de genótipos diferentes, foram responsáveis por alavancar o desenvolvimento dessa cultura no país (ALVES DE SOUSA & CAIERÃO, 2014).

O cultivo deste cereal é bastante difundido, sendo o segundo cereal comestível mais consumido no mundo e responsável por proporcionar em torno de 20% da proteína diária de mais da metade da população mundial. Considerando-se a estimativa de uma população mundial de mais de 9 bilhões de pessoas em 2050, a expectativa é de que a demanda por trigo cresça em pelo menos 60% (LUCAS, 2012).

A cultura de trigo conta com inúmeras variedades, cores e tamanhos, geralmente no formato ovalado. O grão de trigo é composto por três partes básicas, o gérmen (embrião), a casca (proteção natural contra insetos, roedores, patologias, entre outros) e o endosperma (estoque de alimento para o desenvolvimento do embrião) (TAKEITI, 2018). Originalmente classificado como uma planta de clima frio, o trigo se mostrou ao longo dos anos amplamente adaptado a diferentes condições de produção. Diferentes cultivares vêm demonstrando capacidade de desenvolvimento em climas temperados, amenos, além dos frios, com ou sem altas taxas de precipitação, em regiões úmidas ou secas (ACEVEDO *et al.*, 2018).

As diferentes condições climáticas e variedades de solos em que é cultivado, definem dois principais tipos de classificação. O primeiro correlaciona o período do ano em que é cultivado (inverno ou primavera) e o segundo correlaciona o conteúdo de glúten, que é a principal proteína do trigo (TAKEITI, 2018). De acordo com a legislação vigente desde 2009, o trigo no Brasil é classificado em cinco principais classes: brando, pão, melhorador, para outros usos e *Durum* (MATOS SCHEUER *et al.*, 2011).

“O trigo é matéria-prima para a elaboração de alimentos consumidos diariamente, como hábito alimentar, na forma de pães, biscoitos, bolos e massas, alimentos que fazem parte da base da pirâmide alimentar e cujo consumo é incentivado pelo Guia Alimentar da População Brasileira” (MATOS SCHEUER *et al.*, 2011). Assim, a indústria brasileira de processamento

de trigo é parte fundamental da economia do país. Segundo dados da Associação Brasileira das Indústrias do Trigo (Abitrigo), o PIB da cadeia produtiva do trigo foi de R\$ 25,3 bilhões de reais em 2016, divididos como demonstrado na Figura 3.1.1.

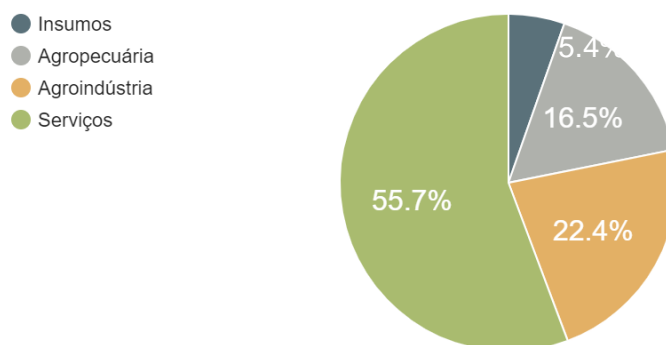


Figura 3.1.1: Divisão do PIB, por setores, da Cadeia Produtiva do Trigo (ABITRIGO, 2018).

Observando a Figura 3.1.1 pode ser constatado que 22,4% do PIB total da cadeia de produção é proveniente da agroindústria, ou seja, de moinhos de processamento de trigo. A distribuição do setor agroindustrial de acordo com a sua localização é apresentada na Figura 3.1.2.

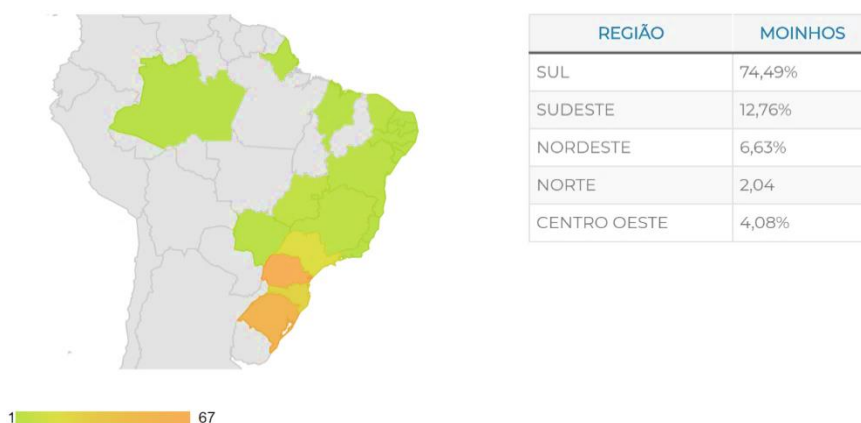


Figura 3.1.2: Mapa ilustrativo da distribuição percentual de moinhos de trigo por região brasileira (ABITRIGO, 2018).

A principal produtora de farinha de trigo no Brasil é a região sul, sendo o Estado do Paraná o maior produtor com 34,18% da produção brasileira total em 2016. Até o ano de 2011 estavam registrados, no Cadastro Nacional de Pessoa Jurídica (CNPJ), 87 empreendimentos

ativos de moinhos de trigo no estado, dos quais 72 efetivamente em funcionamento e distribuídos entre 50 cidades. A distribuição de moinhos de processamento de trigo entre as regiões do estado é apresentada na Figura 3.1.3, em que se destaca a região Oeste como um polo de moinhos de trigo.

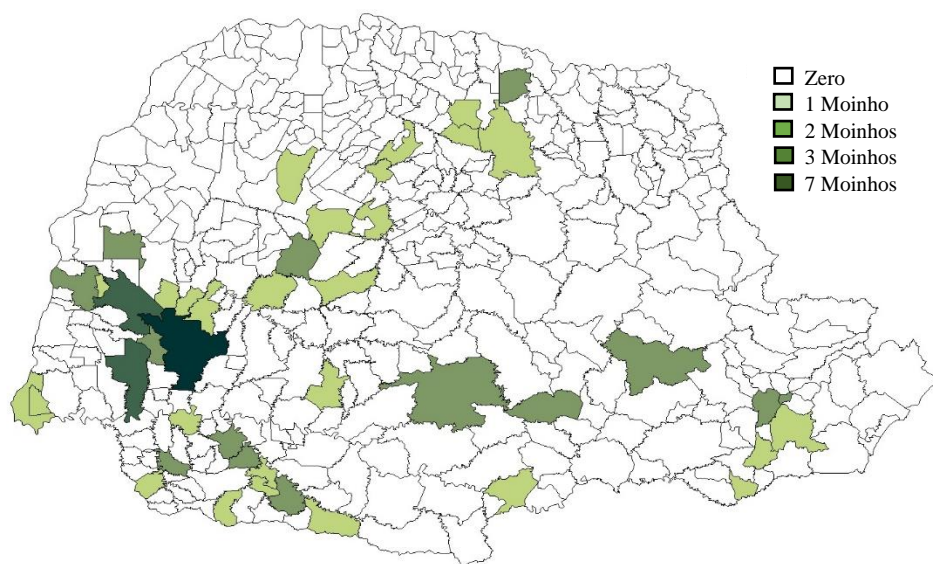


Figura 3.1.3: Mapa ilustrativo do número de moinhos de trigo distribuídos regionalmente no Paraná (SINDITRIGO-PR & FIEP, 2018).

Desta forma, o desenvolvimento de tecnologias que procurem aprimorar os processos envolvidos na cadeia produtiva de trigo, desde o processo de plantio até a sua industrialização, apresentam grande potencial de aceitação e rentabilidade, principalmente nesta região do estado. Um dos processos necessários para o beneficiamento do trigo é a separação entre impurezas provenientes do campo e os grãos recém colhidos, que deve ocorrer antes da entrega do produto às agroindústrias; sendo esta separação predominantemente realizado por equipamentos de pré-limpeza de grãos.

3.2 Equipamentos de pré-limpeza

Majoritariamente, equipamentos convencionalmente utilizados, pelos produtores rurais, para a pré-limpeza de grãos consistem em uma série de peneiras vibratórias que realizam a separação de impurezas baseado na diferença de formato e granulometria entre as partículas indesejadas e os grãos. Apesar de realizarem a tarefa para a qual foram criadas de forma

satisfatória, alguns problemas recorrentes podem ser observados nestas máquinas. À medida que o equipamento é utilizado, as aberturas das peneiras são gradativamente obstruídas, diminuindo, portanto, a eficiência da separação e demandando a interrupção do processamento para a desobstrução das aberturas. Além disso, grãos que seriam próprios ao consumo, porém não possuem tamanho ou formato padrão com relação aos demais, acabam sendo excluídos juntamente com os rejeitos.

Várias patentes, nacionais e internacionais, podem ser relacionadas a separação entre impurezas e grãos. Contudo, a maioria delas se referem a utilização ou otimização de condições operacionais ou configurações alternativas do arranjo de peneiras de separação granulométrica, como é o caso das patentes BR102016004243-7, CN107649362, CN108325815, CN108421701, RU2282976, RU2601594, CN108620319 e US20040106442. Nestes casos, os problemas relacionados a utilização de peneiras não são solucionados. Algumas das demais técnicas se utilizam de uma combinação destas mesmas peneiras juntamente a mecanismos de separação pneumática, seja por aspiração (como é o caso das patentes US007614120, RU2611176 e RU2004130205) ou insuflamento de ar (como proposto nas patentes CN108580284, BR102012006593-2, MU8500482-0, CN108686948 e RU2166383) ou centrífuga (como observado nas patentes US007614120, US20040106442 e MU9000787 - 5). Estas são combinações que, além de não solucionarem os problemas observados na aplicação da separação gravimétrica, acabam adicionando elementos que dificultam os processos de operação, manutenção ou conserto destes equipamentos e podem aumentar os custos de operação. Adicionalmente, os equipamentos que se utilizam apenas da separação pneumática costumam ter *designs* complexos e consumo de energia elevado devido a utilização de pressões negativas de operação, como é o caso mencionado nas patentes BR102012006593-2, BR202017006221-5, MU8900618-6 e BR102016004307-7.

É possível relacionar ainda, a técnica de separação mais próxima ao equipamento proposto, a qual é apresentada na patente intitulada *Air Separator with Rotary Barriers for Upflow Separation of Cereals and Other Loose Materials* (RU2448783), em que as impurezas são sopradas de forma ascendente e posteriormente direcionadas por barreiras rotativas para o outro lado do equipamento que as descarrega automaticamente por meio de uma válvula acionada pelo acúmulo de massa. Entretanto, uma vez que o fluxo de impurezas deve ser ascendente, é necessário que o soprador seja mais potente e por consequência há um maior consumo de energia. Além disso, a possibilidade de dispersão das impurezas no ambiente de separação é muito maior, o que pode diminuir a eficiência da separação.

Portanto, apesar de haver muitas patentes depositadas sobre o assunto de separação de impurezas de grãos, nada consta na busca realizada no Brasil e Exterior a respeito da adaptação e utilização de uma câmara de poeira para realizar a separação de impurezas de grãos na forma proposta neste estudo.

3.3 Propriedades de partículas sólidas

Segundo Gomide (1983), os sólidos particulados são classificados de acordo com seu tamanho nas seguintes categorias:

1. Pós (partículas de 1 μm a 0,5 mm)
2. Sólidos granulares (de 0,5 mm a 10 mm)
3. Blocos pequenos (1 a 5 cm)
4. Blocos médios (5 a 15 cm)
5. Blocos grandes (maiores do que 15 cm).

Com relação as propriedades de partículas, estas podem ser classificadas basicamente em duas categorias. A primeira abrange as propriedades que dependem apenas da natureza da partícula, tais como dureza, permeabilidade, calor específico e densidade. A segunda classificação engloba as propriedades que também dependem do sistema, como condutividade, permeabilidade e densidade aparente (GOMIDE, 1983).

Nos casos em que se trabalha com partículas homogêneas, a caracterização de parâmetros tais como volume e área de superfície externa, se tornam simples. Existem inúmeras maneiras, diretas e indiretas, que se baseiam em princípios físicos diferentes, para se determinar estas variáveis. Entre as técnicas diretas destacam-se o peneiramento e a difração a laser. Entre as indiretas mais comumente utilizadas estão a centrifugação, a decantação, a elutriação e a picnometria (Gomide, 1983).

Na picnometria utiliza-se um picnômetro de volume conhecido para determinar-se indiretamente o diâmetro equivalente de partícula (d_p), que corresponde ao diâmetro da esfera de volume equivalente ao volume da partícula estudada. O procedimento envolve verificar a massa das partículas no picnômetro, preenchê-lo com um líquido de densidade conhecida e finalmente verificar a massa total. Posteriormente, encontra-se o volume total de líquido no picnômetro, através da densidade do líquido, e por consequência o volume das partículas

analisadas (V_p/N , sendo N o número total de partículas). Por fim calcula-se d_p por meio da seguinte relação (Allen, 1981; Massarani, 2002):

$$d_p = \left(\frac{6V_p}{\pi}\right)^{1/3} \quad (3.3.1)$$

No caso de partículas com formas geométricas irregulares, uma de suas dimensões deve ser arbitrariamente escolhida como base para os cálculos de caracterização. Gomide (1983) recomenda a utilização da dimensão imediatamente abaixo da maior, pois é geralmente a mais aproximada ao tamanho obtido experimentalmente.

A partir do volume de partícula (V_p), é possível o cálculo da densidade real de partícula, dado pela Equação 3.3.2:

$$\rho' = \frac{m_p}{V_p} \quad (3.3.2)$$

Em que ρ' corresponde a densidade real das partículas e m_p corresponde a massa das partículas (m_p/N , sendo N o número total de partículas).

Outro parâmetro importante a ser estudado de forma a caracterizar-se uma partícula é a esfericidade. A esfericidade é um fator de forma empírico que relaciona o formato da partícula estudada em relação a uma partícula esférica de mesmo volume (Massarani, 2002). No caso de sementes, ela é calculada conforme a Equação 3.3.3 (CORRÊA *et al.*, 2006; MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2009; SILVA NUNES *et al.*, 2014):

$$\phi = \frac{(abc)^{1/3}}{a} \quad (3.3.3)$$

Em que em que a , b e c correspondem respectivamente aos eixos ortogonais de maior comprimento, médio comprimento e menor comprimento, como demonstrado na Figura 3.3.1.

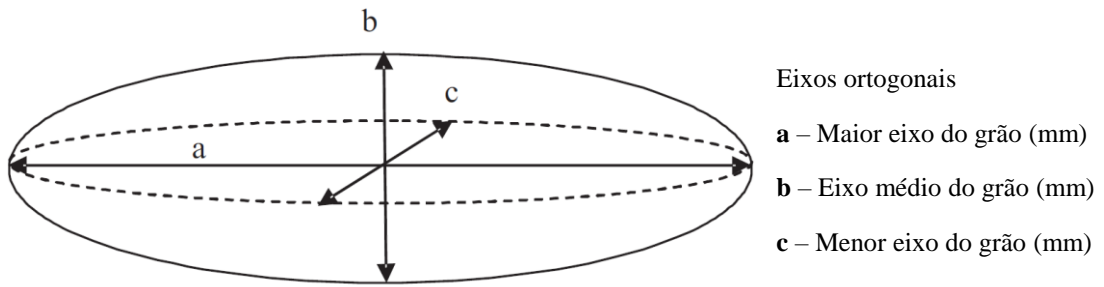


Figura 3.3.1: Desenho esquemático do grão de trigo e suas respectivas dimensões características (CORRÊA *et al.*, 2006).

3.4 Fluidodinâmica de partículas sólidas

A fluidodinâmica de partículas rígidas pode ser descrita por uma série de equações que incluem a equação da continuidade, a equação do movimento de partícula e do fluido, a condição de aderência na interface fluido-partícula, equações constitutivas, além de condições limites pertinentes a cada situação de aplicação. Considerando uma partícula de massa (m), volume (V_p) e densidade (ρ'), que se move em determinado fluido, a uma velocidade (u), enquanto o fluido, de densidade ρ , se move a uma velocidade v , obtemos que a equação que caracteriza o movimento da partícula (3.4.1) é (MASSARANI, 1997):

$$m \frac{du}{dt} = V_p (\rho' - \rho) \vec{B} + F_d \quad (3.4.1)$$

Sendo \vec{B} a aceleração externa relativa ao campo ao qual a partícula está submetida (gravitacional ou centrífugo), e F_d a força resistiva que o fluido exerce ao deslocamento, a qual é calculada empiricamente de acordo com a Equação (3.4.2):

$$F_d = A \frac{1}{2} \rho \|v - u\|^2 c_D \frac{v - u}{\|v - u\|} \quad (3.4.2)$$

Em que,

$$A = \frac{\pi d_p^2}{S} \quad (3.4.3)$$

Em que S representa a área superficial da partícula e c_D corresponde ao coeficiente de arraste, que denota a resistência que o fluido oferece ao escoamento da partícula (MASSARANI, 1997).

A força resistiva (F_d) é diretamente dependente das dimensões e formato de partícula, do campo de velocidade do fluido sem a perturbação da partícula e do histórico de aceleração da partícula. Além disso, é influenciada pela presença de contornos rígidos e pela presença de outras partículas - em ambos os casos há redução na velocidade terminal (u_t) da partícula se comparada a velocidade terminal (u) da partícula isolada (MASSARANI, 1997).

Adotando como dimensão característica o diâmetro volumétrico (d_p) e a esfericidade (ϕ) de maneira a caracterizar o formato da partícula, a exemplo de Allen (1981), o coeficiente de arraste (c_D) e número de Reynolds (R_e) são dados pelas Equações 3.4.4 e 3.4.5, respectivamente:

$$c_D = \frac{4 d_p (\rho' - \rho) \cdot g}{3 \rho \cdot u_t^2} \quad (3.4.4)$$

$$R_e = \frac{\rho d_p U}{\mu} \quad (3.4.5)$$

$$U = |v - u| \quad (3.4.6)$$

Em que u corresponde à velocidade da partícula isolada, μ corresponde a viscosidade dinâmica do fluido, U corresponde a velocidade relativa entre a velocidade de escoamento do fluido e a velocidade de escoamento da partícula (Equação 3.4.6) e g corresponde à aceleração gravitacional.

A partir das equações acima (3.4.4, 3.4.5, 3.4.6), é possível definir relações adimensionais que auxiliam nos cálculos nos casos em que U ou d_p é desconhecido, respectivamente:

$$c_D R_e^2 = \frac{4 d_p^3 \rho (\rho' - \rho) g}{3 \mu^2} \quad (3.4.7)$$

$$\frac{c_D}{R_e} = \frac{4 \mu (\rho' - \rho) g}{3 \rho^2 U^3} \quad (3.4.8)$$

Utilizando-se destas relações adimensionais (Equações 3.4.7 e 3.4.8), é possível calcular o coeficiente de arraste (c_D) para partículas isométricas (partículas esféricas, ou na forma de poliedros regulares), válidas para $Re < 50.000$ e $0,65 < \phi < 1$, por meio das seguintes relações 3.4.9 à 3.4.13:

$$c_D = \left[\left(\frac{24}{K_1 Re} \right)^{0,85} + K_2^{0,85} \right]^{1/0,85} \quad (3.4.9)$$

$$Re = \left[\left(\frac{K_1 c_D Re^2}{24} \right)^{-1,2} + \left(\frac{c_D Re^2}{K_2} \right)^{-1,2/2} \right]^{-1/1,2} \quad (3.4.10)$$

$$Re = \left[\left(\frac{24}{K_1 c_D / Re} \right)^{1,3/2} + \left(\frac{K_2}{c_D / Re} \right)^{1,3} \right]^{1/01,3} \quad (3.4.11)$$

$$K_1 = 0,843 \log \left(\frac{\phi}{0,065} \right) \quad (3.4.12)$$

$$K_2 = 5,31 - 4,88\phi \quad (3.4.13)$$

Em que K_1 e K_2 são constantes calculadas com base na esfericidade da partícula em estudo.

3.4.1 Influência da presença de fronteiras rígidas

A velocidade terminal de uma partícula (u_t) que se movimenta em um fluido pode variar em função de sua distância com relação às fronteiras rígidas que as rodeiam (MASSARANI, 1997). Assim, o parâmetro k_p é utilizado como fator de correção na velocidade terminal desta partícula (Equação 3.4.1.1), ou seja:

$$u_t = k_p u_\infty \quad (3.4.1.1)$$

Em que, u_t representa a velocidade terminal numa dada condição de distância da parede, enquanto u_∞ representa a velocidade terminal da partícula isolada. No caso de partículas isométricas com $0,65 < \phi < 1$ e $0 < D/D_t < 0,5$ (em que D_t é o diâmetro do tubo de escoamento), a correção (k_p) pode ser calculada de acordo com as relações 3.4.2.2 à 3.4.2.6:

Para $Re_\infty < 0,1$:

$$k_p = \left(\frac{1 - \beta}{1 - 0,475 \beta} \right)^4 \quad (3.4.1.2)$$

Para $0,1 < Re_\infty < 1.000$:

$$k_p = \frac{10}{1 + A Re_\infty^B} \quad (3.4.1.3)$$

$$A = 8,91 e^{2,79 \beta} \quad (3.4.1.4)$$

$$B = 0,00117 - 0,281 \beta \quad (3.4.1.5)$$

Para $Re_\infty > 1.000$:

$$k_p = 1 - \beta^{1,5} \quad (3.4.1.6)$$

Sendo Re_∞ calculado com base na velocidade terminal da partícula isolada, conforme Equação 3.4.1.7, e β calculado pela Equação 3.4.1.8:

$$Re_\infty = \frac{\rho d_p u_\infty}{\mu} \quad (3.4.1.7)$$

$$\beta = \frac{d_p}{D_t} \quad (3.4.1.8)$$

3.4.2 Influência da concentração de partículas

A velocidade terminal de uma partícula (u_t) é reduzida devido a presença de outras partículas. A correção de Richardson e Zaki (1954), válida para partículas arredondas que apresentam porosidades (ε) inferiores à 75%, pode ser utilizada nestes casos, conforme Equações 3.4.2.1 a 3.4.2.6 (MASSARANI, 2002):

$$u_t = u_\infty \varepsilon^n \quad (3.4.2.1)$$

Ou,

$$U = u_\infty \varepsilon^n \quad (3.4.2.2)$$

Para $Re_\infty < 0,2$:

$$n = 3,65 \quad (3.4.2.3)$$

Para $0,2 < Re_{\infty} < 1$:

$$n = 4,35 Re_{\infty}^{-0,03} - 1 \quad (3.4.2.4)$$

Para $1 < Re_{\infty} < 500$:

$$n = 4,45 Re_{\infty}^{-0,1} - 1 \quad (3.4.2.5)$$

Para $Re_{\infty} > 500$:

$$n = 1,39 \quad (3.4.2.6)$$

3.5 Separação de materiais

Na indústria é frequente a utilização de processos de separação de materiais, tais como classificação de partículas de acordo com seu tamanho, eliminação de impurezas de determinado reagente e separações de poluentes suspensos em efluentes gasosos. Para estes casos aplicam-se as operações unitárias destinadas a separações mecânicas, físico-químicas ou mesmo químicas.

As separações mecânicas são aquelas que envolvem processos unicamente mecânicos para separar misturas heterogêneas, como no caso do peneiramento, filtração e decantação. As separações físico-químicas utilizam-se de propriedades como o ponto de ebulição ou solubilidade em determinado solvente, para efetuar a separação, como no caso da destilação. Nas separações químicas são utilizados um ou mais reagentes que atacam apenas as moléculas de interesse, não conseguindo reagir com as demais. A única operação unitária que contempla a separação química é a absorção química (GOMIDE, 1980).

3.5.1 Separações mecânicas

Separações mecânicas são classificadas de acordo com o tipo de sistema (sólidos, sólidos e líquidos, sólidos/líquidos e gases, e líquidos imiscíveis), as propriedades utilizadas na separação (tamanho, densidade, inércia e propriedades eletromagnéticas) e o mecanismo de separação (dinâmicas ou estáticas) (GOMIDE, 1980). A escolha do equipamento adequado para determinada separação leva em conta tanto o tipo de separação a ser empregado, quanto o julgamento técnico e pessoal do profissional encarregado.

No caso da separação sólido-gás, existem três métodos básicos de separação: decantação, filtração e centrifugação. Os equipamentos comumente empregados para esta finalidade são filtros, coletores inerciais, coletores centrífugos (ciclone), precipitadores eletrostáticos e câmaras gravitacionais (coletores gravitacionais) (GOMIDE, 1980).

Os filtros são meios porosos capazes de coletar partículas sólidas por interceptação direta e impactação inercial, geralmente dispostos em forma de placas ou painéis. São comumente constituídos com materiais restauráveis ou de fácil substituição, tais como, tecidos (nylon, teflon, amianto), lã de vidro, fibra de vidro, papel celulósico entre outros (MACINTYRE, 1990).

Coletores inerciais tem seu princípio de funcionamento baseado na grande diferença de quantidade de movimento entre as partículas sólidas e o gás. Uma vez que, uma mudança de direção é menos pronunciada nas linhas de correntes de sólidos que nas de gás, há uma facilidade na indução de colisão com paredes ou chicanas. Após a colisão, por gravidade as partículas chegam aos pontos de coleta. Estes equipamentos são geralmente utilizados como pré-coletores para partículas grandes (50 e 200 μm) e com elevado peso específico. São baratos de construir e possuem baixo custo de manutenção e operação, porém, as partículas tendem a redispersão devido às elevadas velocidades da corrente gasosa (MACINTYRE, 1990).

Ciclones são os equipamentos mais amplamente utilizados para separações sólido-gás. Funcionam forçando uma suspensão a escoar em espiral, de maneira que as partículas escoem nas paredes de um espaço confinado. Por gravidade as partículas descendem até o ponto de coleta, enquanto o ar é soprado para fora de forma ascendente. Esses equipamentos possuem inúmeras aplicações industriais tanto para recuperação de produtos, quanto em sistemas para limpeza de gás. Em geral são eficazes na separação de partículas maiores que 10 μm , e permitem trabalhar em altas temperaturas e pressões, além de necessitarem de pouca manutenção, serem baratos e fáceis de construir (WANG *et al.*, 2004).

Precipitadores eletrostáticos são os dispositivos mais eficientes na captação de partículas sólidas extremamente finas (0,1 μm). Seu princípio de funcionamento consiste na passagem de gás entre dois eletrodos com uma diferença de potencial, ionizando assim a suspensão. As partículas carregadas negativamente são atraídas por uma superfície coletora carregada positivamente (ligada a terra), eliminando-as da suspensão. Precipitadores eletrostáticos são caracterizados por sua eficiência elevada, sua perda de carga praticamente

desprezível, e sua capacidade de operação em altas temperaturas. Em contrapartida, demandam um grande investimento inicial, especialmente para altas vazões de ar (GOMIDE, 1980).

Coletores gravitacionais consistem essencialmente em grandes câmaras metálicas que desaceleram o ar carregado de partículas sólidas em suspensão, nelas introduzido por meio de um duto de alimentação pequeno, de forma a permitir que as partículas maiores em suspensão decantem. Possuem as vantagens de serem simples tanto de projetar quanto de construir, têm baixo custo de operação, sofrem pouco desgaste, podem receber gases em elevada temperatura e consomem pouca potência (MACINTYRE, 1990).

3.5.2 Câmaras gravitacionais

São equipamentos de sedimentação projetados para remoção de partículas sólidas e/ou líquidas de uma corrente gasosa, que possuem inúmeras aplicações, como na limpeza de ar de ventilação, retirada de cinzas de uma corrente de efluentes gasosos, recuperação de produtos de alto valor agregado, coleta de um produto na forma de poeira, melhoramento da qualidade de certo produto, entre outras (CHEREMISINOFF, 2000). Coletores de câmaras gravitacionais possuem um *design* simples e são de fácil operação.

De acordo com Gomide (1980), a sedimentação livre baseada em peso próprio é o método mais antigo de separação de partículas e/ou gotículas de uma corrente gasosa. Bastante simples e funcional no caso de partículas grosseiras, o método é usualmente empregado em indústrias metalúrgicas, de enxofre e arsênio. Entretanto, a eficiência do método decresce para partículas pequenas (inferiores a 50 μm).

As câmaras gravitacionais são expansões do duto de ventilação pelo qual o ar contendo partículas escoam. Se a seção transversal da câmara for suficientemente grande, permitirá que a velocidade do ar seja pequena, o que torna as forças gravitacionais que agem sobre a partícula superiores as forças inerciais, resultando na deposição de partículas no interior da câmara. É recomendada uma velocidade do ar de operação entre 1,5 e 3 m/s, e que esta seja mantida no intervalo de 0,02 e 0,6 m/s no interior da câmara, para evitar a dispersão de partículas. A Figura 3.5.1 apresenta o modelo de uma câmara gravitacional de dois estágios (GOMIDE, 1980).

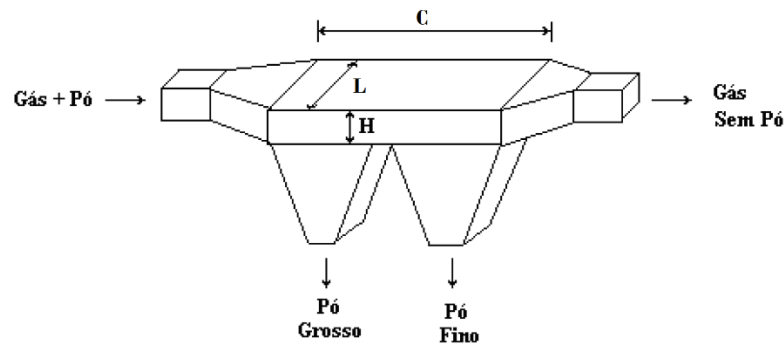


Figura 3.5.1: Modelo esquemático de uma câmara gravitacional de dois estágios (GOMIDE, 1980).

Dimensionar uma câmara de poeira consiste em calcular sua profundidade (H), sua largura (L) e seu comprimento (C). Considerando que não há turbulência dentro da câmara, as partículas decantam a velocidade terminal (u_t). Assim, o tempo de residência do gás no equipamento é calculado pela Equação 3.5.2.1:

$$t = \frac{H}{u_t} \quad (3.5.2.1)$$

Seja a vazão volumétrica de ar dada por Q, determina-se a velocidade v do gás (3.5.2.2) e o tempo de residência do gás (3.5.2.3):

$$v = \frac{Q}{L H} \quad (3.5.2.2)$$

$$t = \frac{C}{v} \quad (3.5.2.3)$$

Igualando as equações (3.5.2.1 e 3.5.2.3) para o tempo de residência do gás obtemos a relação 3.5.2.4:

$$\frac{H}{C} = \frac{u_t}{v} \quad (3.5.2.4)$$

A relação $\frac{L}{H}$ deve ser escolhida pelo projetista de acordo com o espaço disponível. Seções quadradas favorecem a distribuição uniforme das partículas, enquanto projetos com profundidade reduzida resultam em tempo de residência e comprimento menor, o que pode acarretar problemas na retirada de pó (GOMIDE, 1980).

Se considerarmos regime permanente e laminar de escoamento viscoso (regime de Stokes, $Re_{\infty} < 0,4$), a velocidade terminal (u_{∞}) das partículas é calculada de acordo com a Equação (3.5.2.5):

$$u_{\infty} = \frac{gD^2(\rho' - \rho)}{18\mu} \quad (3.5.2.5)$$

No caso de regimes intermediários de escoamento, $0,4 < Re_{\infty} < 500$, o cálculo é dado por 3.5.2.6:

$$u_{\infty} = \left[\frac{4}{225} \frac{(\rho' - \rho)^2 g^2}{\rho \mu} \right]^{1/3} D \quad (3.5.2.6)$$

Para regimes turbulentos, $500 < Re_{\infty} < 2,5 \cdot 10^5$, tem-se:

$$u_{\infty} = \left[3,1 \frac{gD(\rho' - \rho)}{\rho} \right]^{1/2} \quad (3.5.2.7)$$

Em que, g corresponde ao campo gravitacional, D é a dimensão característica da partícula, que neste contexto corresponde ao diâmetro equivalente da partícula (d_p), μ é a viscosidade do gás, ρ é a densidade do gás e ρ' é a densidade da partícula. Recomenda-se para o projeto de uma câmara com velocidade de gás de 0,3 m/s que a velocidade de partícula considerada seja a metade da velocidade terminal calculada no regime de Stokes, pois considera-se a turbulência da câmara e a forma das partículas (GOMIDE, 1980).

Para partículas grandes (algumas centenas de micrometros), pode ser utilizada a relação de Allen para prever a velocidade terminal (ALLEN, 1981):

$$u_{\infty} = \frac{0,153D^{1,14}(\rho'g)^{0,71}}{\rho^{0,29}\mu^{0,43}} \quad (3.5.2.8)$$

Apesar da idealidade de operação de câmaras gravitacionais ser a operação em regime de Stokes, esta opção se torna inviável devido a demanda de espaço e tempo de residência que seriam necessários para seu bom desempenho. Assim sendo, em escala industrial os equipamentos são operados em regime turbulento. Para aumentar a eficiência de separação, utiliza-se de chicanas ou anteparos (placas dispostas alternadamente) de forma a obter-se maior deposição de pós finos, além de vários estágios para aproximar ao máximo o escoamento ao laminar, conforme esquematizado na Figura 3.5.2 (GOMIDE, 1980; MACINTYRE, 1990).

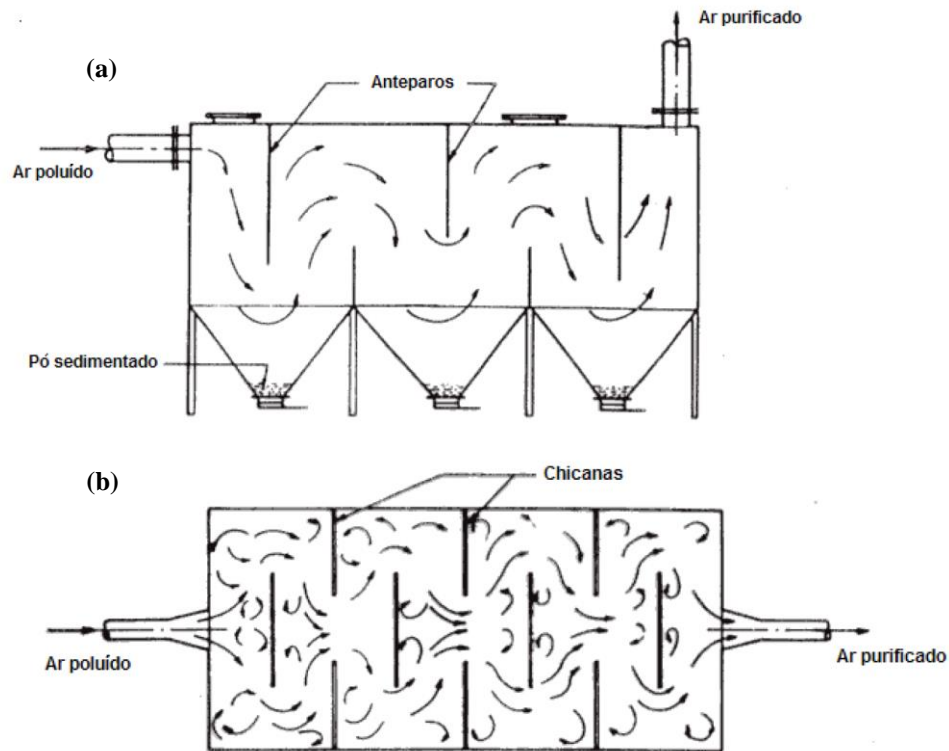


Figura 3.5.2: Modelo esquemático de uma câmara gravitacional de três estágios com chicanas, Corte Lateral (a) e Corte Superior (b) (MACINTYRE, 1990).

A perda de carga devido à perda de velocidade na entrada da câmara e o estreitamento na saída pode ser aproximada a 1,5 - 2 vezes a pressão de velocidade de saída do duto de ar purificado (GOMIDE, 1980).

3.6 Análise e modelagem de processos

De acordo com Himmelblau e Bischoff (1968), analisar um processo consiste na aplicação de ferramentas científicas para reconhecer, definir e desenvolver procedimentos de resolução para problemas particulares. Uma análise de processos envolve estudar globalmente o processo e também os processos alternativos e sua viabilidade econômica, por meio de três etapas distintas:

1. Especificação matemática do problema para determinada condição física;
2. Detalhada análise para obtenção/síntese das relações que governam as interações existentes no processo;
3. Apresentação de resultados para assegurar total entendimento do processo.

A análise e modelagem matemática de processos constitui ferramenta fundamental para compreender e resolver problemas e processos complexos, visto que conjuntos de relações matemáticas podem ser utilizados para simular o comportamento de fenômenos físicos ou químicos, facilitando assim a compreensão de tais fenômenos, bem como, dos processos aos quais estes fenômenos são parte integrante.

Modelos matemáticos permitem uma investigação tanto de subcomponentes de processo, quanto do processo de forma global, de maneira estruturada e controlada, minimizando os riscos inerentes a implementação de qualquer processo. Uma vez obtido um modelo matemático satisfatório é possível utilizá-lo para inúmeras finalidades como, para estimar o custo capital de projetos, controlar processos, projetar, dimensionar e desenvolver equipamentos, ou mesmo simular o comportamento de processos em condições preestabelecidas.

3.7 Simulação de processos

Em se tratando da resolução de problemas envolvendo modelos matemáticos empíricos, o emprego de ferramentas computacionais tem facilitado e agilizado grandemente o dia a dia da engenharia. Com estas ferramentas, cálculos complexos são resolvidos rapidamente, sistemas são integralmente estudados e projetos são finalizados com precisão sem a necessidade de desperdício de recursos. Por este motivo, a simulação de processos em softwares matemáticos se transformou em uma parte lógica e fundamental no desenvolvimento de projetos de inovação.

Simulação consiste em projetar um modelo computacional a partir de um modelo real e realizar experimentos com este modelo, com a finalidade de entender o comportamento de um processo e/ou avaliar estratégias para operá-lo (PEGDEN *et al.*, 1995). Portanto, a simulação é um processo amplo, envolvendo não apenas a construção do modelo, mas também, todo o procedimento experimental que o complementa incluindo a descrição do comportamento do sistema, a construção de teorias e hipóteses com base nas observações efetuadas e uso do modelo para prever comportamentos futuros (FILHO, 2008).

Os estudos simulados permitem respostas muito precisas a respeito de hipóteses de um processo, uma vez que, não são necessárias tantas simplificações de modo a aproximar o modelo da idealidade, pois os cálculos são efetuados computacionalmente. Segundo Filho (2008), as principais razões para simular são: a possibilidade de simular processos reais ainda

inexistentes (como no caso de projetos de inovação tecnológica, estrutural, econômica, etc.), a possibilidade de efetuar experimentos com gastos reduzidos (experimentar em sistemas reais exige alto investimento) ou mesmo em casos em que experimentar com o sistema real não é apropriado (como em situações de procedimento emergencial, em que não se pode causar uma catástrofe simplesmente para averiguar as possibilidades).

Algumas das vantagens de simular processos, de acordo com Banks (1984) e Pegden *et al.* (1995) são:

- Um mesmo modelo pode ser utilizado inúmeras vezes em diferentes condições de operação de projeto;
- É possível analisar um sistema proposto mesmo que os dados de entrada ainda estejam em processo de criação/modificação;
- Em geral, simular é um caminho mais fácil que métodos analíticos;
- Uma simulação não exige grande número de simplificações como acontece nos métodos analíticos, representando assim uma estimativa muito mais precisa do processo real;
- Como os modelos de simulação podem ser bastante detalhados, é possível testar-se novas políticas e procedimentos operacionais sem necessidade de perturbar o sistema real;
- Hipóteses a respeito de como ou por que fenômenos ainda não explicados ocorrem, podem ser facilmente testadas;
- O tempo em que um fenômeno acontece pode ser acelerado ou desacelerado para fins de estudos mais detalhados, o que não ocorre em testes com processos reais;
- Permite uma melhor compreensão a respeito de quais variáveis interferem significativamente no processo;
- Facilita a identificação de “gargalos” de produção, tais como fluxos de materiais, informação e produtos;
- Apresenta detalhadamente a realidade de como o sistema opera em detrimento a idealidade esperada;
- Admite estudar situações sobre as quais se tenha pouco ou nenhum conhecimento, permitindo assim uma boa aproximação da realidade do que pode ser esperado a partir de tal situação.

No entanto, na simulação de processos existem algumas desvantagens:

- Além do treinamento inerente necessário para a criação de um modelo condizente com o processo a ser estudado, modelos criados por pessoas diferentes para uma mesma finalidade dificilmente serão iguais;
- Por levar em consideração a variabilidade do sistema real, em muitos casos o resultado de uma simulação é difícil de ser interpretado;
- A criação de um modelo detalhado para a experimentação em sistemas simulados costuma consumir muito tempo. Em consequência, muitas vezes uma alternativa analítica simplificada conduz a resultados mais rápidos e com menores riscos econômicos de implementação.

3.7.1 Utilização do Visual Basic (VBA) na simulação de processos

O *Visual Basic* é uma linguagem de programação completa integrada ao pacote *Microsoft Office*. Posto que o VBA foi construído como uma extensão do pacote *Office*, trabalhando em conjunto com este pacote, não necessita da mesma robustez em termos de programação que outras linguagens possuem, as quais constroem aplicações completas do zero. Por este motivo, o VBA é consideravelmente menos intimidador e mais fácil de aprender que as demais linguagens (BIRNBAUM, 2005). Associado a este fato, tem-se que o Excel possui a aplicação de planilhas mais popular no mundo, tornando o VBA prático e eficaz na execução de modelos simples, como os que em geral regem a programação de processos de separação sólido-fluido.

3.8 Tratamento estatístico de dados

A obtenção de dados experimentais requer na sequência uma adequada análise destes dados. Para tanto, é necessário conhecer ferramentas estatísticas específicas que nos permitam uma avaliação eficaz, apropriada e objetiva dos dados obtidos experimentalmente. A metodologia estatística se divide em dois grandes grupos: a estatística paramétrica, a qual se utiliza de parâmetros tais como média, variância e desvio padrão derivada da distribuição simétrica de Gauss (distribuição normal) e a estatística não paramétrica, em que os métodos independem do tipo de distribuição (RODRIGUES & IEMMA, 2009).

Dentro da estatística paramétrica, muitas vezes a busca do pesquisador é por uma relação matemática que possa descrever determinado fenômeno ou processo. Para que este objetivo

seja atingido, os dados experimentais devem ser correlacionados em uma equação do tipo $y = f(x)$, formulando assim um modelo. Os ajustes de variáveis neste contexto se dividem em simples (quando avalia-se apenas uma variável independente) e múltiplos (quando avalia-se mais de uma variável independente de uma só vez).

Em se tratando de modelos, é importante definir a diferença entre modelos mecânicos, empíricos e globais. Um modelo é dito mecânico quando é possível prever o comportamento de certo processo devido ao conhecimento dos mecanismos/causas que o provocam, ou seja, este tipo de modelo busca explicar o processo. Em se tratando de um modelo empírico, busca-se apenas descrever o comportamento de determinado processo, baseando-se em dados experimentais. Os modelos globais possuem aplicação universal na descrição de um fenômeno, como é o caso das leis de Newton (BARROS NETO *et al.*, 2007).

Ajustado um modelo aos dados experimentais é necessário se verificar a sua precisão na predição de pontos reais. Para tanto, existem algumas análises estatísticas específicas que servem como critério de averiguação. Uma destas análises é a ANOVA (*Analysis of Variance* ou Análise de Variância), a qual consiste em uma decomposição da variabilidade total do conjunto observado, em uma soma de quadrados dos componentes associados à sua variação (MONTGOMERY & RUNGER, 2013). A ANOVA avalia numericamente a qualidade de ajuste do modelo estatístico, fornecendo como resultado o coeficiente de determinação do modelo (R^2).

Além da ANOVA, a análise gráfica dos resíduos também se faz necessária para atestar a qualidade de um modelo. São dois os principais gráficos a serem apurados: i) o ajuste dos resíduos a distribuição normal. Este gráfico ajuda na identificação de *outliers* (valores atípicos se comparados aos demais dados experimentais, em geral decorridos de algum tipo de erro), posto que, se os erros se distribuem normalmente, 95% dos valores dos resíduos padronizados devem estar no intervalo entre -2 e 2. ii) os valores preditos versus valores observados. Este gráfico permite a verificação de resultados experimentais tendenciosos. Idealmente, deve apresentar-se em ordem aleatória de distribuição em torno de zero.

3.9 Planejamento experimental

O planejamento experimental se baseia em princípios estatísticos, e tem como principal objetivo extrair, a partir do estudo de um sistema específico, o maior número de informações úteis, utilizando-se de um número mínimo de experimentos. Para tanto, os experimentos devem

ser projetados de forma a fornecerem exatamente o tipo de informação a qual procuramos no intuito de modelar ou ainda otimizar determinado processo (BARROS NETO *et al.*, 2007).

Desta forma, a escolha da metodologia de planejamento a ser empregada é dependente da finalidade para a qual o pesquisador visa utilizá-la. Os tipos de planejamento mais comumente encontrados na literatura incluem: planejamento fatorial completo, planejamento fatorial fracionado, planejamento saturado de Plackett e Burman, e metodologia de superfície de resposta (*Response Surface Methodology* - RSM).

O planejamento fatorial completo é utilizado quando não se conhece a exata relação existente entre diferentes variáveis e as possíveis interações entre elas. Neste caso é estabelecido um modelo polinomial empírico de primeira ordem, que possa descrever o comportamento das respostas obtidas experimentalmente para todas as combinações de variáveis (fatores) e seus níveis. Os níveis são os valores adotados para cada fator de forma a estabelecer-se um intervalo espacial ao qual determinado modelo se aplica. Planejamentos fatoriais trabalham com dois níveis para cada fator, um superior e um inferior, ou seja, o número de ensaios a serem realizados é de 2^k , onde k o número de fatores com dois níveis (SARAMAGO & STEFFEN JR., 2008).

Tanto o planejamento fatorial fracionário, quanto o planejamento Saturado de Plackett e Burman, consistem em métodos de triagem de variáveis, pois permitem estudar muitos fatores de uma só vez. Isto é, estes dois tipos de planejamento são utilizados para verificar quais são as principais variáveis de maior influência sobre a resposta do processo estudado. Ambos os planejamentos requerem um estudo complementar utilizando-se de outro método para a determinação de um modelo empírico adequado.

A RSM consiste em uma série de técnicas de modelagem por mínimos quadrados que objetivam otimizar uma ou mais respostas de um processo influenciado por diversas variáveis diferentes (MONTGOMERY, 2013). Possui duas etapas distintas: a etapa de modelagem, que consiste em ajustar um modelo polinomial adequadamente aos pontos experimentais (descrevendo uma superfície de resposta), e a etapa de deslocamento, em que utiliza-se do caminho de máxima inclinação (caminho sobre a superfície resposta que descreve a influência mais pronunciada das variáveis na resposta) para maximizar ou minimizar a resposta. Ambas as etapas da RSM são repetidas quantas vezes for necessário para atingir-se as condições ótimas de operação (BARROS NETO *et al.*, 2007). Dentre os métodos de modelagem mais usuais

destacam-se o planejamento (delineamento) composto central rotacional (DCCR), planejamento de Box-Behnken (PBB) e a matriz de Doehlert (MD).

Os planejamentos DCCR e PBB consistem em planejamentos fatoriais ampliados, que fornecem modelos de segunda ordem. Ambos são eficazes na obtenção de uma indicação de curvatura, além de apresentarem baixa complexidade (MONTGOMERY, 2013). No caso do DCCR, a ampliação é realizada adicionando-se pontos axiais (α) aos pontos de vértice existentes no planejamento fatorial completo, por meio de uma rotação do eixo em torno do ponto central. As Equações (3.9.1 e 3.9.2) apresentam o cálculo destes pontos axiais, bem como, o número total de ensaios necessários, respectivamente.

$$\pm\alpha = \pm(2^k)^{1/4} \quad (3.9.1)$$

$$N = 2^k + 2k + C_0 \quad (3.9.2)$$

Em que k é número de fatores, N é o número de ensaios e C_0 é o número de replicatas no ponto central.

O PBB é utilizado apenas para planejamento fatorial de três níveis para cada fator, além disso, não possui pontos de vértice, sendo empregado principalmente quando há uma limitação física ou econômica nos pontos de máximo e/ou mínimo estudados. Os pontos axiais empregados seguem distribuições matriciais específicas propostas por Box e Behnken em 1960. O número de ensaios total é calculado de acordo com a Equação 3.9.3:

$$N = 2k(k - 1) + C_0 \quad (3.9.3)$$

A matriz de Doehlert apresenta um domínio esférico com uma distribuição uniforme de dados experimentais, permitindo assim, uma boa ideia do domínio experimental total sem necessitar de um modelo prévio ou a distinção de pontos críticos do modelo, como os pontos de máximo e mínimo por exemplo (PRADELLE *et al.*, 2016; CALDAS, 2013). Neste tipo de planejamento o número de níveis não é o mesmo para todas as variáveis (fatores). No caso do planejamento para dois fatores, uma variável possui cinco níveis enquanto a outra apenas três. Como resultado, a distribuição de pontos experimentais apresenta formato hexagonal. O total de experimentos a serem realizados é calculado pela Equação (3.9.4).

$$N = k^2 + k + C_0 \quad (3.9.4)$$

Assim como nos planejamentos DCCR e PBB, a matriz de Doehlert fornece um modelo polinomial quadrático empírico. Além disso, nos três modelos mencionados, os valores reais

das variáveis estão relacionados a um número normalizado no intervalo entre -1 e 1, relacionados de acordo com a Equação (3.9.5).

$$x_i = \frac{X_i - X_i^0}{\Delta X_i} \quad (3.9.5)$$

Em que x_i varia entre -1 e 1, X_i corresponde ao valor normalizado, X_i^0 corresponde ao valor real e ΔX_i corresponde à metade da diferença entre os valores máximo e mínimo reais.

Adicionalmente, em alguns casos pode existir mais de uma variável resposta a ser avaliada em um único processo. Neste contexto, é necessário utilizar-se de um método de otimização simultâneo. O método de Derringer e Suish proposto em 1980 é baseado na definição de função desejabilidade para cada resposta. A desejabilidade varia no intervalo entre 0 e 1, em que 0 representa o valor menos desejado da função e 1 representa o valor mais desejado da função. O método de Derringer e Suish propõe inicialmente que uma função desejabilidade para cada resposta seja definida, e posteriormente, define-se uma função desejabilidade global. Desta forma, a otimização simultânea baseia-se apenas na busca do melhor valor possível da função desejabilidade global (BARROS NETO *et al.*, 2007).

Seja m o número de respostas existentes e d_i a função desejabilidade individual da resposta i , a desejabilidade global (D): é dada pela Equação 3.9.6:

$$D = \sqrt[m]{d_1 d_2 d_3 \dots d_m} \quad (3.9.6)$$

3.10 Estado da arte

Os fundamentos da separação granular por câmara de poeira vêm sendo utilizados industrialmente ao longo dos anos, majoritariamente, com o intuito de segregar partículas suspensas de forma a purificar correntes de ar antes de sua liberação no ambiente. Assim, este estudo tem caráter inovador, uma vez que demonstra uma maneira que possibilita sanar problemas específicos e recorrentes, com relação a separação de impurezas de grãos, na agroindústria graneleira, por meio da utilização destes fundamentos no desenvolvimento e aplicação de uma nova tecnologia. Além disso, apesar das equações de projeto do equipamento aqui proposto serem baseadas nas equações de projeto de uma câmara de poeira convencional, existem diferenças estruturais fundamentais entre ambos, que também ressaltam o caráter inovador deste trabalho. Dentre estas diferenças, pode ser citado o formato cilíndrico da câmara de separação, a alimentação perpendicular entre os grãos e a corrente de ar e a existência de

apenas um estágio voltado a coleta de grãos de todos os tamanhos. Portanto, o emprego desta técnica na separação sólido-sólido entre grãos e impurezas disponibiliza uma nova gama de aplicações de câmaras de poeira em processos industriais e agrícolas.

4. Metodologia

4.1 Caracterização do Grão de Trigo

As amostras foram coletadas diretamente do campo, na propriedade de um produtor regional, logo após a colheita do trigo, que ocorreu nos meses de agosto e setembro de 2018. O produtor colaborador trabalhou com trigo das variedades Toruk, classificado como pão/melhorador, e cd150, classificado como melhorador. As amostras coletadas contêm ambas as variedades da cultura.

Em laboratório, 50 grãos de trigo foram selecionados e tiveram suas três dimensões medidas por um paquímetro. Posteriormente, as médias das respectivas dimensões foram calculadas e, a partir destas, a esfericidade (ϕ) média dos grãos pode ser aferida de acordo com a equação 3.3.3.

Para calcular o diâmetro médio de partícula utilizou-se a técnica de picnometria. Inicialmente, um picnômetro de 10 mL, de massa conhecida, teve seu volume total preenchido com água destilada e a sua massa aferida, para que a densidade da água (ρ_a , em que $\rho_a = m/V$) fosse calculada. Em seguida, o picnômetro foi esvaziado e seco. Os 50 grãos de trigo selecionados anteriormente foram, então, inseridos no picnômetro e tiveram a sua massa determinada. Posteriormente, o picnômetro contendo os grãos foi preenchido com água destilada, até a totalidade de seu volume e, novamente, sua massa foi medida. Assim foi possível verificar o volume dos grãos (V_p), bem como, calcular-se o diâmetro equivalente dos grãos (d_p) e sua densidade (ρ'), de acordo com as equações 3.3.1 e 3.3.2, respectivamente.

4.2 Simulação do processo de separação

Determinado os valores das variáveis V_p , d_p e ρ' pelo procedimento de caracterização de partícula, era necessário estabelecer-se a vazão de ar que seria empregada no processo de separação, de forma a possibilitar o desenvolvimento de uma interface de simulação no *Visual Basic* (VBA). Como instrumento fornecedor de ar para o processo de separação utilizou-se um soprador de folhas de pequeno porte, da marca Setga Ferramentas, com 600 W de potência. A velocidade do ar foi medida com um anemômetro (Thermo Anemometer TAD-500), e sua vazão calculada multiplicando-se a velocidade aferida pela área da abertura de saída de ar do soprador. Como o soprador oferecia a possibilidade de ajuste de velocidade, foi possível determinar as vazões mínima e máxima de trabalho, além de vazões intermediárias.

As informações verificadas possibilitaram a programação e execução da simulação para determinar o dimensionamento do módulo com base em diferentes condições de operação. Durante este estudo, a simulação foi utilizada em dois momentos distintos. O primeiro consistiu em simular as condições para o módulo experimental de bancada, em que não se levou em consideração os efeitos de concentração de partículas ou os efeitos das paredes rígidas. O segundo momento se referiu a simulação do protótipo em escala piloto e, devido a necessidade de maior precisão de resultados, desta vez considerou-se ambos os efeitos anteriormente ignorados.

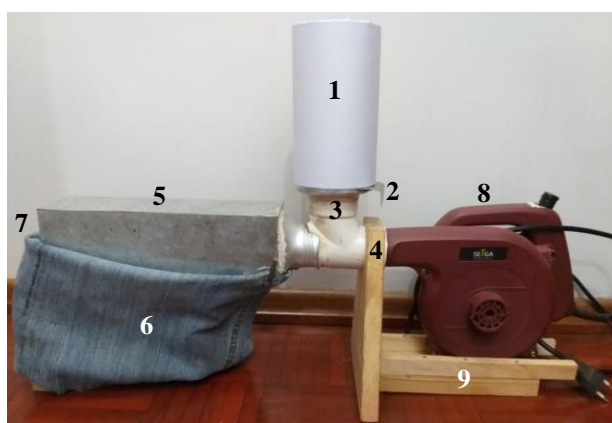
O modelo matemático utilizado foi baseado nos modelos de fluidodinâmica de partículas e câmara de poeira descrito pelas equações 3.4.1 a 3.4.2.6. Uma vez que o modelo de fluidodinâmica de partículas considera a viscosidade do ar em suas equações, e esta por sua vez é influenciada pela temperatura ambiente, utilizou-se na simulação quatro viscosidades distintas, cada uma equivalente a um valor de temperatura, de forma a se traçar um perfil que relacionasse temperatura do ar e comprimento de equipamento a ser projetado. As temperaturas avaliadas foram 0, 10, 20 e 30 °C, de forma a abranger a variação de temperatura na região Oeste do Paraná. O programa VBA final utilizado que deu origem a interface de simulação no Excel pode ser verificado no Apêndice B.

4.3 Construção e teste do módulo de separação experimental de bancada

Esta etapa do estudo teve a finalidade de testar o processo de separação de forma prática, para avaliar-se a real possibilidade da construção de um equipamento para sua aplicação em larga escala. Por esse motivo, o módulo experimental foi construído com materiais de baixo custo disponíveis tais como, placa metálica de aço galvanizado para compor a câmara, cilindro metálico para a alimentação com a possibilidade de controle de vazão de grãos, tecido ou lona como coletor de sementes e uma junção de PVC para ligar a turbina ao alimentador e a câmara.

A Figura 4.3.1 apresenta o módulo experimental de bancada construído. Para a construção da câmara de separação a placa de aço foi dobrada, para que não houvesse a necessidade de soldas que pudessem gerar espaços mortos em seu interior, de forma a constituir três laterais de seção transversal de 0,0025 m². O comprimento da câmara foi determinado como sendo 0,25 m, de acordo com os resultados da primeira etapa de simulação. Na parte inferior da câmara foi adicionado uma espécie de funil de tecido, o qual auxiliou na coleta de grãos processados. Uma conexão tubular em forma de “T” de PVC e abertura lateral de 25 mm

e central de 35 mm, foi utilizada para conectar a alimentação de grãos, a alimentação de ar e a câmara de separação. Um tubo de alumínio cortado, com 15 cm de altura e 6 cm de diâmetro, foi utilizado para o armazenamento de grãos não processados. Na base inferior, o tubo possui duas aberturas, uma lateral, que serve para o encaixe de uma placa metálica utilizada para controlar a vazão de entrada de grãos, e uma interior, que permite a passagem de grãos para o tubo de PVC. O módulo contava com suportes de madeira para acoplamento do soprador e nivelamento da câmara de separação.



Estruturas constituintes do módulo experimental de bancada

1. Tanque de armazenamento de grãos não processados
2. Controle de vazão de grãos
3. Entrada de grãos não processados
4. Entrada de ar
5. Câmara de separação
6. Coletor de grãos processados
7. Saída de ar e impurezas
8. Soprador de ar centrífugo
9. Estrutura de nivelamento

Figura 4.3.1: Módulo experimental de bancada utilizado na separação de grãos e impurezas e suas estruturas constituintes (Fonte: o autor).

Após a construção do módulo de bancada, foram iniciados os testes com as sementes de trigo. Os testes consistiam em adicionar-se ao recipiente de armazenamento de grãos não processados (alimentador) uma quantidade previamente pesada de trigo proveniente diretamente da colheita. Posteriormente, estando o soprador ligado e regulado para fornecer uma vazão de ar fixa ($0,0108 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), a placa metálica utilizada para controle de vazão de grãos era aberta até que se permitisse a passagem de grãos de acordo com a vazão desejada. Para auxiliar na regulagem da vazão de grãos, a placa foi marcada em pontos estratégicos de abertura. O processamento do trigo resultava na maior parte das impurezas sendo insufladas para fora do módulo, através da abertura lateral da câmara de separação (saída de ar e impurezas). Após toda a massa de trigo ter passado pelo equipamento, as impurezas ainda restantes na amostra eram separadas manualmente e pesadas. Os grãos sem as impurezas também eram pesados. Desta forma se obteve tanto o percentual de impurezas restante na amostra quanto a quantidade de sementes sopradas para fora do equipamento durante o processo de separação.

No intuito de se avaliar estatisticamente a efetividade e possibilidade de predição da separação provida pelo módulo, realizou-se um planejamento experimental de superfície de resposta, pela técnica da matriz de Doehlert. Considerou-se dois parâmetros (fatores) para fins de análise, a massa de grãos (MG) e a vazão de grãos na alimentação, controlada através do tamanho da abertura de alimentação (AA). As variáveis respostas analisadas foram o percentual de impureza restante na amostra após o processamento e o percentual de perda (grãos soprados para fora do equipamento juntamente com as impurezas).

Experimentos preliminares foram realizados de forma a conhecer o comportamento fluidodinâmico das partículas durante o processo de separação e assim determinar-se o ponto central de operação utilizado do planejamento. Estes experimentos foram realizados adicionando-se ao tanque de armazenamento de grãos massas de 100, 200, 300 e 400 g de trigo para serem processadas, com abertura total de alimentação e vazão de ar intermediária de $0,0108 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a temperatura ambiente de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Uma duplicata foi realizada em cada ponto, e a média entre as duplicatas foi determinada, de maneira a determinar-se um ponto de mínimo nas variáveis resposta (perda e impureza).

Os níveis codificados e valores reais de cada variável independente são apresentados na Tabela 4.3.1.

Tabela 4.3.1: Níveis codificados e valores reais de cada variável independente utilizados no planejamento experimental por matriz de Doehlert do módulo de separação experimental de bancada.

Variáveis	Níveis				
	-0,866	0	0,866		
AA: Abertura de Alimentação (mm)	2,345	17,5	32,655		
	1	-0,5	0	0,5	1
MG: Massa de Grãos (g)	100	200	300	400	500

Os dados obtidos foram tratados no software Statistica versão 7.1. Também se realizou, um estudo de otimização das variáveis de operação por meio da função de desejabilidade, buscando-se condições mínimas relativas ao percentual de perda e de impurezas contida nos grãos após o processamento.

4.4 Construção e teste do protótipo de separação construído em escala piloto

Depois de testado o processo de separação, por meio do módulo experimental de bancada, e verificado sua eficácia na separação de impurezas, a próxima etapa do estudo consistiu na construção e averiguação de um protótipo em escala piloto. Construído a partir de materiais mais adequados à utilização deste tipo de separação pneumática em grande escala, o protótipo foi concebido com modificações estruturais de forma a obter-se resultados melhores e mais aproximados a realidade da utilização do equipamento nas propriedades rurais. As Figuras 4.4.1 a, b e c apresentam o desenho do projeto metálico estrutural do equipamento, bem como a vista com corte lateral desta estrutura e a válvula borboleta (mecanismo utilizado para controle de vazão de grãos), respectivamente. Os desenhos foram desenvolvidos no software SolidWorks.

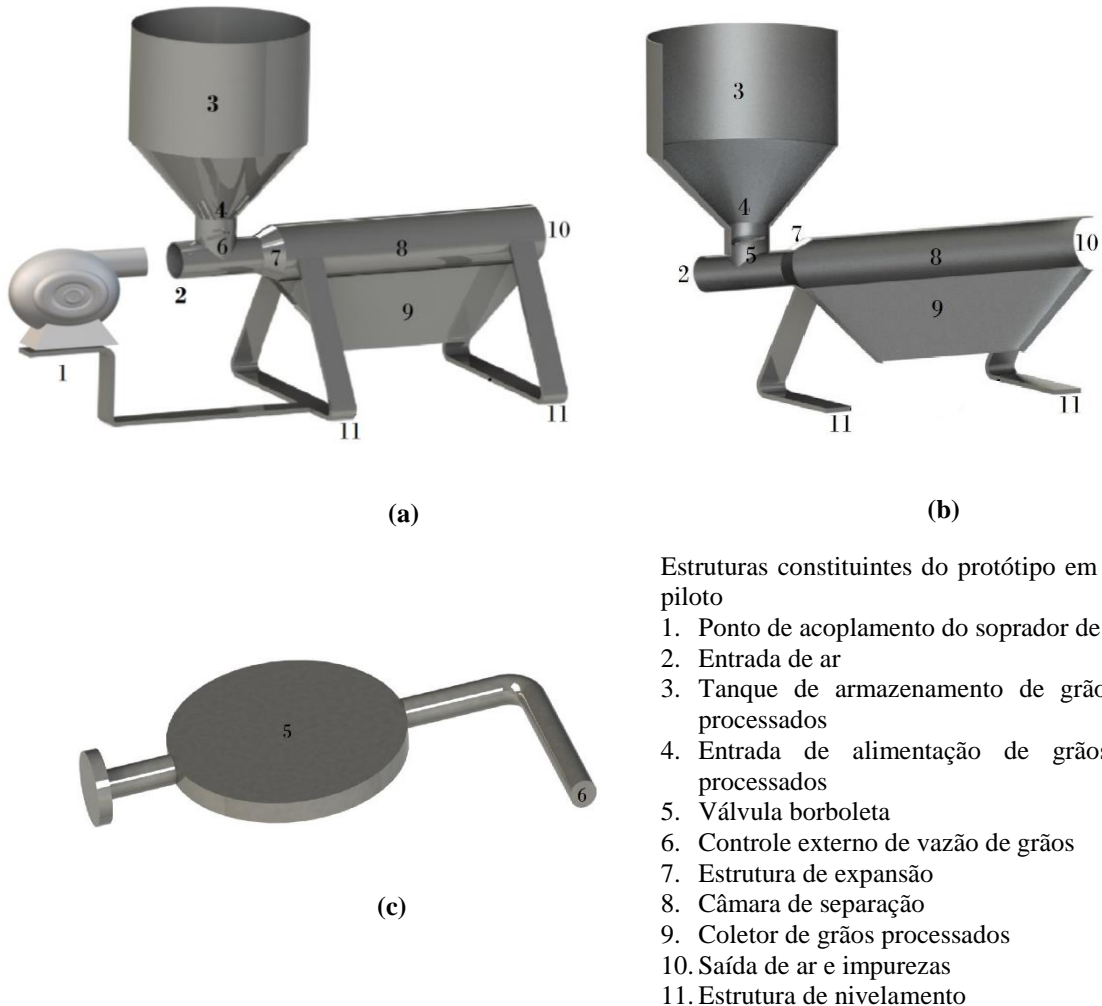


Figura 4.4.1: (a) Desenho esquemático do projeto da estrutura metálica do protótipo em escala piloto no SolidWorks. (b) Vista com corte lateral do projeto da estrutura metálica do protótipo em escala piloto. (c) Desenho esquemático da válvula borboleta, utilizada para controle de vazão de grãos na alimentação (Fonte: o autor).

Como demonstrado na Figura 4.4.1 (a), a câmara de separação de formato cilíndrico (8), com diâmetro de 0,05 m, constitui o corpo central do equipamento e é disposta paralelamente ao chão. Em uma das extremidades da câmara de separação encontram-se a alimentação de ar, com abertura de 25 mm, também disposta paralelamente ao chão, e a alimentação de grãos não processados disposta perpendicularmente a entrada de ar, com abertura de 35 mm. As alimentações de ar (2) e de grãos não processados (4) conformam uma conjunção em “T” de área transversal circular, posteriormente ligado a câmara de separação por meio da estrutura de expansão (7), no formato de um tronco cônico circular reto. A vazão de grãos na entrada de alimentação (4) é controlada através da válvula borboleta (5) a qual possui um mecanismo de regulação de vazão externo (6), como apresentado nas Figura 4.4.1. (b) e (c). Acoplado acima da alimentação de grãos encontra-se o reservatório de armazenamento de grãos não processados (3), em formato cilíndrico. Opostamente a entrada de ar está localizada a saída de ar e impurezas (10). E ainda, acoplado a parte inferior da câmara de separação localiza-se o coletor de grãos processados (9), o qual possui formato de tronco piramidal reto de base retangular, e abrange todo o comprimento da câmara de separação.

Toda a estrutura descrita deveria ser constituída preferencialmente em aço inox, uma vez que os grãos podem ser utilizados para consumo alimentar humano. No entanto, para fins de teste da escala piloto, esta estrutura foi construída em ferro fundido. As estruturas individuais foram unidas por soldagem externa para evitar a ocorrência de protuberâncias/espacos mortos internos que possam atrapalhar o processo de separação. Além disso, o funcionamento do equipamento exige um soprador de ar de potência adequada a quantidade de produto a ser processado, que deve ser acoplado no ponto (1), como exposto na Figura 4.4.1 (a). Neste caso manteve-se o mesmo soprador utilizado nos testes com o módulo experimental de bancada, o qual consiste em um soprador inercial do tipo ciclone. O protótipo em escala piloto construído é apresentado na Figura 4.4.2.



Figura 4.4.2: Protótipo de câmara gravitacional utilizado na separação de impurezas e grãos de trigo, construído em escala piloto (Fonte: o autor).

Após a construção do protótipo em escala piloto, novamente realizaram-se testes com as sementes de trigo. Os testes consistiam em adicionar-se ao tanque de armazenamento de grãos não processados uma quantidade previamente pesada de trigo proveniente diretamente do campo. Posteriormente, estando o soprador ligado e regulado para fornecer a velocidade de ar estabelecida no planejamento experimental, previamente aferida pelo anemômetro, a válvula borboleta era aberta até que se permitisse a passagem de grãos de acordo com o desejado. Para auxiliar na regulagem da vazão de grãos, o mecanismo externo de controle da válvula foi marcado em pontos estratégicos de abertura, em acordo com o planejamento experimental. Após toda a massa de trigo ter passado pelo equipamento, as impurezas ainda restantes na amostra eram separadas manualmente e pesadas. Os grãos sem as impurezas, bem como, os grãos que se acumulavam no interior da junção em “T” durante o procedimento, também eram pesados. Desta forma se obteve o percentual de impurezas restante na amostra, a quantidade de sementes sopradas para fora do equipamento durante o processo de separação e a quantidade de grãos que se acumulava no interior do equipamento.

Considerou-se três variáveis (fatores) para análise, a massa de grãos (MG), a velocidade do ar (V) e a abertura de alimentação (AA). As variáveis respostas foram o percentual de impureza, o percentual de perda e o percentual de acúmulo de grãos no equipamento. Os níveis codificados e valor real de cada variável independente são apresentados na Tabela 4.4.1.

Tabela 4.4.1: Níveis codificados e valores reais de cada variável independente utilizados no planejamento experimental por matriz de Doehlert do protótipo de separação construído em escala piloto.

Variáveis	Níveis						
	-0,817	0	0,817				
AA: Abertura de Alimentação (mm)	5,9	32,5	59,1				
	1	-0,5	0	0,5	1		
MG: Massa de Grãos (g)	100	200	300	400	500		
	-0,866	-0,577	-0,289	0	0,289	0,577	0,866
V: Velocidade do ar (m/s)	6,1	8,6	11	13,5	16	18,4	20,9

Os dados obtidos foram tratados no *software* Statistica versão 7.1. Adicionalmente, se realizou um estudo de otimização das variáveis de operação por meio da função de desejabilidade, buscando-se condições mínimas relativas ao percentual de perda, acúmulo no equipamento, e de impurezas contidas nos grãos após o processamento.

5. Resultados

5.1 Caracterização do Grão de Trigo

As medidas das dimensões a, b e c dos grãos de trigo aferidas com o paquímetro, bem como, as médias das respectivas medidas são apresentadas na Tabela 5.1.1, as quais foram posteriormente utilizadas no cálculo de esfericidade (ϕ) dos grãos.

Tabela 5.1.1: Dimensões a, b e c dos eixos ortogonais dos grãos de trigo e suas respectivas médias comparados às dimensões aferidas em estudos na literatura para diferentes cultivares e diferentes teores de umidade de grãos.

<i>Amostra</i>	<i>a (mm)</i>		<i>b (mm)</i>		<i>c (mm)</i>	
1	5,80	6,40	3,15	3,75	2,60	3,30
2	6,25	6,35	3,35	3,25	2,90	2,70
3	6,10	6,10	3,15	3,20	2,60	2,80
4	5,60	6,05	3,05	3,30	2,65	2,80
5	6,10	6,20	3,25	3,35	2,70	3,00
6	5,50	5,90	3,00	3,65	2,70	3,05
7	5,80	6,30	3,30	3,60	2,80	2,85
8	6,00	6,30	3,45	3,15	3,00	2,60
9	6,10	6,30	3,30	3,20	2,80	2,70
10	5,60	6,00	3,50	3,30	2,80	2,50
11	5,80	6,30	3,30	3,30	2,80	2,70
12	6,20	6,25	3,00	3,20	2,70	2,55
13	6,20	6,00	3,40	3,25	2,60	2,75
14	5,70	6,40	3,20	3,50	2,45	3,10
15	6,10	6,15	3,55	3,20	2,80	2,65
16	5,60	6,30	3,20	3,35	2,50	2,70
17	5,75	6,15	3,35	3,15	2,70	2,45
18	5,85	6,10	3,10	3,20	2,30	2,55
19	5,75	5,95	3,30	3,35	2,60	2,75
20	6,10	6,40	3,45	3,35	2,80	2,75
21	5,80	6,10	3,10	3,30	2,45	2,60
22	5,90	6,20	3,00	3,30	2,45	3,15
23	5,60	5,90	3,20	3,45	2,55	3,10
24	5,90	6,10	3,30	3,20	2,60	2,65
25	5,95	6,10	3,30	3,30	2,60	2,70
Médias	6,03 ± 0,24		3,29 ± 0,16		2,72 ± 0,20	
Dimensões aferidos em outros dois estudos						
*Diferentes cultivares	5,50 – 6,64		2,89 – 3,14		2,50 – 2,70	
**Diferentes teores de umidade	6,0 – 7,0		3,0 – 4,0		2,0 – 3,0	

* Adaptado de Silva Nunes *et al.* (2014). ** Adaptado de Guimarães & Telis-Romero (2018).

É verificado na Tabela 5.5.1 que as medidas de uma mesma dimensão em cada semente, não apresentam grandes variações entre si, pois o desvio padrão aferido é pequeno. Além disso, as médias das dimensões aferidas também são condizentes com valores encontrados em outros estudos, como de Silva Nunes *et al.* (2014) e Guimarães & Telis-Romero (2018).

A Tabela 5.1.2 mostra os resultados obtidos a partir da técnica da picnometria para a variável densidade da água (ρ_a), bem como, a esfericidade (ϕ), volume (V_p), diâmetro equivalente (d_p) e densidade (ρ') dos grãos.

Tabela 5.1.2: Valores de volume, densidade, esfericidade e diâmetro equivalente de grão, obtidos por meio da técnica de picnometria, comparados aos valores destas mesmas variáveis obtidos em estudos na literatura para diferentes cultivares e diferentes teores de umidade de grãos.

Variáveis Aferidas		*Diferentes cultivares	**Diferentes teores de umidade
Volume do grão (cm ³)	0,027	0,022–0,029	-
Densidade de grão (g/cm ³)	1,262	-	1,1–1,6
Esfericidade	0,627	0,559–0,630	0,5–0,7
Diâmetro equivalente (cm)	0,373	-	3,2–4,7
Volume do picnômetro (mL)	10	-	-
Densidade da água (g/cm ³)	0,996	-	-

* Adaptado de Silva Nunes *et al.* (2014). ** Adaptado de Guimarães & Telis-Romero (2018).

Os valores de densidade, volume, diâmetro equivalente e esfericidade do grão, aferidos a temperatura ambiente de 28 °C, corroboram com os resultados de outros trabalhos, como de Guimarães & Telis-Romero (2018) e Silva Nunes *et al.* (2014), para diferentes cultivares e diferentes percentuais de umidade. A aferição precisa destas variáveis é de fundamental importância para obter-se resultados de simulação condizentes com a realidade do processamento.

5.2 Simulação das condições operacionais do processo de separação para estimar os valores das variáveis de projeto do módulo experimental de bancada


Os valores máximo, mínimo e intermediários da velocidade do ar aferidos com o anemômetro, além do diâmetro de saída de ar, área transversal ao fluxo de ar e vazão de ar fornecida pelo soprador são mostradas na Tabela 5.2.1.

Tabela 5.2.1: Valores da velocidade do ar e diâmetro do soprador medidos a partir do soprador de ar, e da vazão de ar e área de saída de ar calculadas a partir das respectivas medidas.

Velocidade do ar (m/s)	Vazão de ar (m ³ /s)
4,30	0,0028
14,10	0,0090
16,80	0,0108
18,20	0,0117
21,70	0,0139
Diâmetro do soprador (m)	0,02855
Área (m ²)	0,00064

A Figura 5.2.1 apresenta uma imagem da interface de simulação criada no *Visual Basic* (VBA). Como pode ser observado, a interface contém a opção de escolha entre culturas, uma vez que, existe a possibilidade futura desta mesma técnica de separação ser aplicado a outros tipos de grãos. Como a temperatura influencia na viscosidade do ar, podendo assim influenciar também na separação, houve a necessidade de avaliação do seu efeito em relação ao processo. As temperaturas avaliadas foram escolhidas de forma a simular a amplitude de condições climáticas existentes na região Oeste do Paraná. Dentre as variáveis de entrada foram incluídas a vazão de ar, o diâmetro equivalente de partícula e a medida de uma das arestas da secção transversal ao escoamento de ar. Cabe ressaltar que, como recomendado em Gomide (1980), a secção da câmara transversal ao escoamento de ar foi considerada inicialmente quadrada, posto que, isso auxilia na distribuição uniforme do escoamento. As variáveis resposta determinadas foram a velocidade de ar na câmara de separação, a distância a partir da entrada que estaria o último estágio de coleta e o comprimento total da câmara, o qual possui uma margem de segurança de 20 cm além do valor estimado para o último estágio da câmara. Finalmente, os títulos dos botões presentes na interface designaram suas respectivas funções no programa.

Estimativa das Variáveis de Projeto de uma Câmara Gravitacional



Qual a cultura utilizada?

Trigo Soja Milho

Qual é a temperatura do ar (°C)?

0 10 20 30

Variáveis de entrada:

Altura / Largura da câmara de separação (m):

Diâmetro equivalente do grão (m):

Vazão de ar (m³/s):

Variáveis de projeto:

Último Estágio (m):

Comprimento da Câmara de Separação (m):

Velocidade do ar (m/s):

Figura 5.2.1: Interface de simulação VBA utilizada para estimar/calcular os valores das variáveis de projeto do módulo experimental de bancada em diferentes condições operacionais. (Fonte: o autor)

Esta simulação foi concebida com o intuito de estimar-se as dimensões do equipamento a ser construído, diferentemente de projetos de módulos de câmara de poeira convencionais, em que se define o diâmetro de partícula recolhido em cada estágio, baseado em dimensões preestabelecidas. Assim, o último estágio da câmara projetada consiste, teoricamente, na distância em que o grão de diâmetro equivalente médio cairia a partir da entrada da câmara. Por esse motivo, o comprimento do equipamento deve apresentar tamanho superior ao comprimento em que se encontraria o último estágio. E ainda, como o intuito do projeto foi de soprar as impurezas para fora da câmara, enquanto os grãos de todos os tamanhos e formas seriam coletados, não existe necessidade de subdivisões em inúmeros estágios.

As Figuras 5.2.2 (a) e (b) demonstram uma compilação dos resultados obtidos na simulação executada, em diferentes condições de temperatura e comprimento de uma das

arestas da secção transversal, para o protótipo em escala piloto, a qual levou em consideração os efeitos de concentração de partículas e de paredes rígidas.

As simulações foram realizadas em duas condições de operação diferentes. Isso porque, em se tratando das condições de operação do soprador, em geral, vazões de ar intermediárias resultam em maior estabilidade, enquanto na condição de maior vazão é possível que haja maior eficiência no processo de separação. Desta forma, é possível avaliar-se a variação entre condições de comprimento máximo e intermediário de câmara.

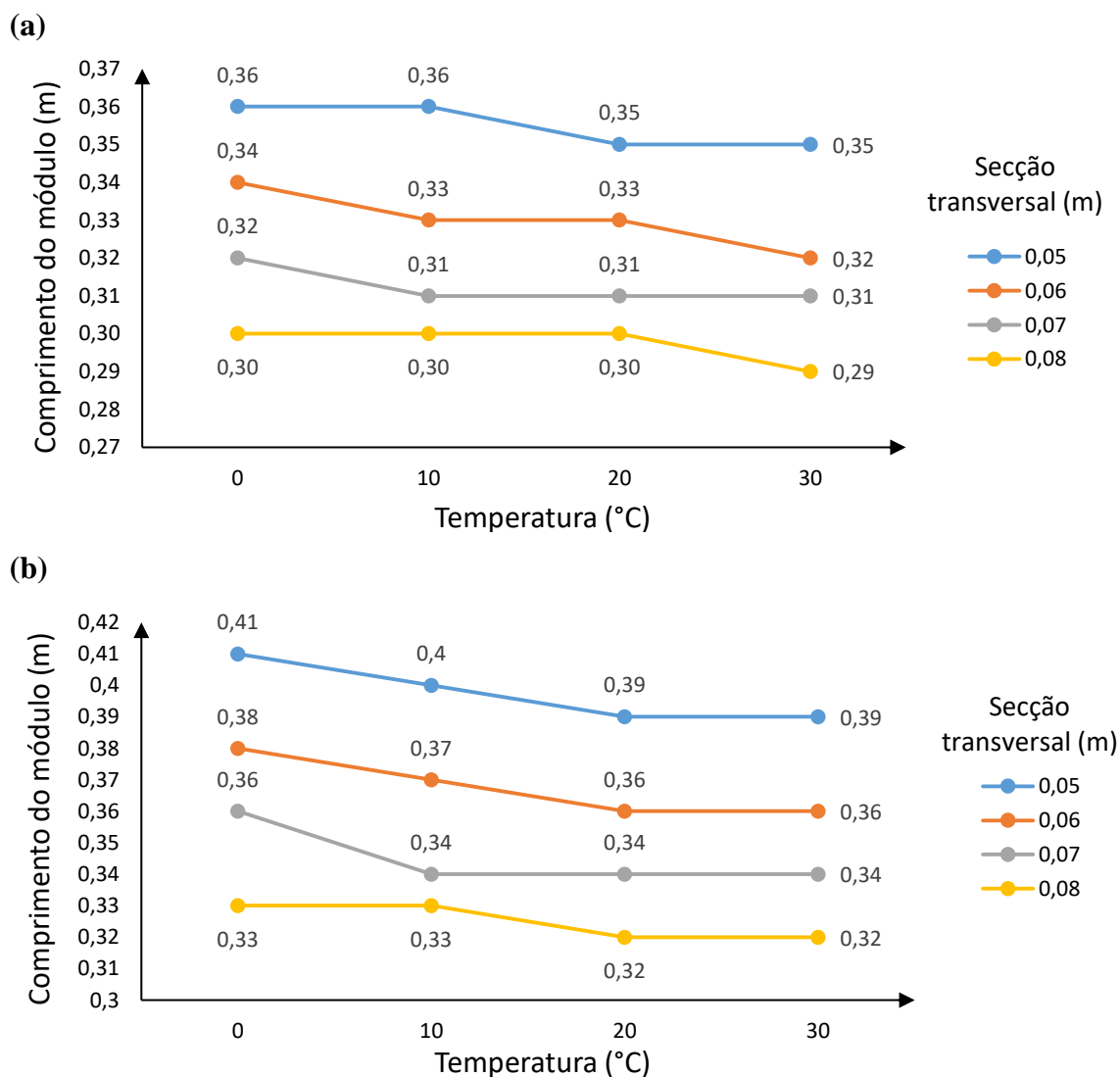


Figura 5.2.2: Compilado dos valores das dimensões de câmara gravitacional em função da temperatura, obtidas a partir da simulação do processo de separação, para as vazões de 0,0108 (a) e 0,0139 (b) $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, respectivamente.

Na Figura 5.2.2, é possível perceber que conforme a temperatura de operação aumenta o comprimento estimado para o módulo diminui, isso porque o aumento de temperatura resulta na diminuição da viscosidade do ar, e por consequência, diminui a distância pela qual o ar carrega a semente. Adicionalmente, verifica-se que para a vazão mais alta de ar o módulo experimental apresenta comprimento ligeiramente maior que na vazão menor, uma vez que, vazões de ar maiores resultam em carregamento de grãos por distâncias maiores.

A partir dos resultados obtidos na simulação, decidiu-se pela construção de um protótipo em escala piloto com 32 cm de comprimento, posto que, este é um valor médio dentre os resultados apresentados na Figura 5.2.2. O comprimento intermediário de câmara proporcionou a operação do protótipo em vazões intermediárias de ar, o que possibilita o processamento futuro de outros tipos de sementes, tanto de maior, quanto de menor, velocidade terminal que o trigo, sem a necessidade de alteração no *design* deste.

5.3 Módulo experimental de bancada

Os resultados obtidos nos testes experimentais de perdas e impurezas para o grão de trigo, apresentados na Figura 5.3.1, foram utilizados para se determinar o ponto central de operação no planejamento experimental de Doehlert.

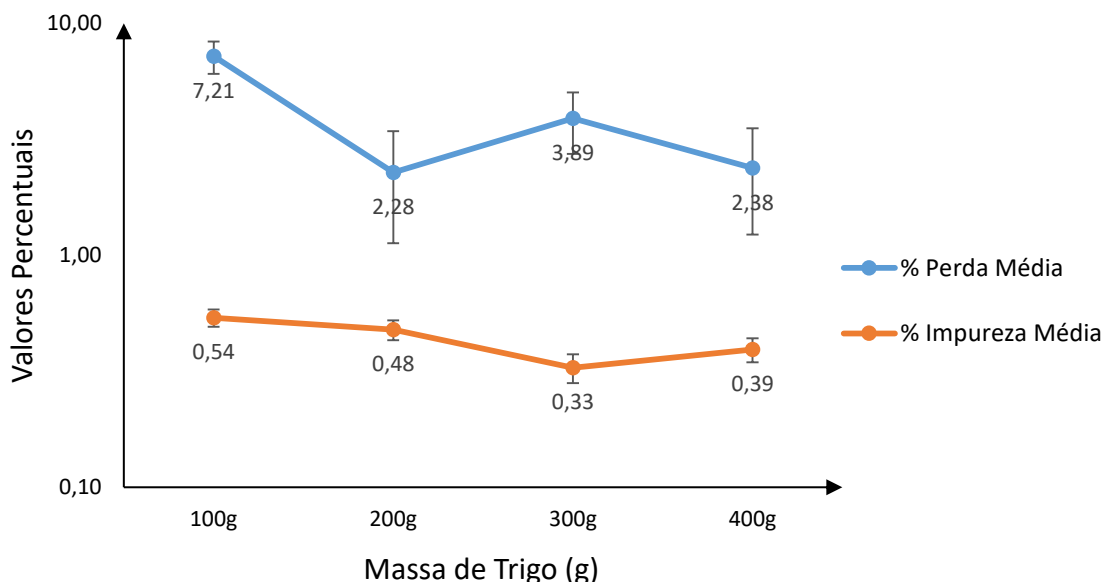


Figura 5.3.1: Valores percentuais médios de perda e impureza em função da massa de grãos de trigo obtidos a partir de testes preliminares com o módulo experimental de bancada, na vazão de ar de $0,0108 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Na Figura 5.3.1 observa-se um ponto de mínimo, em se tratando da variável resposta percentual de impureza, quando o experimento foi realizado com 300 g de amostra. Por esse motivo, o ponto central para a variável independente massa de grãos (MG) foi estabelecido neste valor, sendo a variação entre pontos experimentais estabelecida em 100 g. Adicionalmente, se verifica que o módulo construído foi eficiente no processo de separação de impurezas presentes nos grãos de trigo, e portanto atingiu seu objetivo principal, que consistiu em se obter percentuais de impureza inferiores a 1% em massa, atendendo o requisito imposto por empresas receptoras de grãos em geral. Também se constata que na menor massa de grãos, 100 g, o percentual de perda é superior ao dobro dos demais pontos aferidos, o que demonstra que existe maior facilidade no sopramento de grãos para fora do equipamento quando a quantidade de grãos no fluxo de ar é menor.

Quanto a abertura de alimentação (AA), o ponto central foi determinado com base no diâmetro total da entrada de alimentação (35 mm). Assim, o ponto central correspondeu à metade do diâmetro total de abertura (17,5 mm), havendo uma variação de 15,155 mm entre o ponto central e os axiais.

A Tabela 5.3.1 apresenta a matriz de Doehlert para as variáveis independentes (massa de grãos e abertura de alimentação), com triplicata no ponto central, bem como, os resultados experimentais para o percentual de impureza, restante na amostra após o processamento, e o percentual de perda (grãos soprados para fora do equipamento juntamente com as impurezas). Os códigos de cada valor experimental de acordo com a matriz são apresentados ao lado dos valores reais das variáveis.

Tabela 5.3.1: Valores reais e codificados da matriz de Doehlert e percentuais de impureza e perda avaliados no planejamento experimental dos testes efetuados com o módulo experimental de bancada.

Experimento	Massa de Grãos (g)	Abertura de Alimentação (mm)	% de Impureza	% de Perda
1	300 (0)	17,5 (0)	0,11	1,62
2	300 (0)	17,5 (0)	0,08	3,88
3	300 (0)	17,5 (0)	0,13	4,00
4	500 (1,0)	17,5 (0)	0,24	2,09
5	400 (0,5)	32,655 (0,866)	0,22	1,67
6	100 (-1,0)	17,5 (0)	0,27	5,51
7	200 (-0,5)	2,345 (-0,866)	0,25	19,73
8	400 (0,5)	2,345 (-0,866)	0,17	2,91
9	200 (-0,5)	32,655 (0,866)	0,28	0,88

A Tabela 5.3.1 demonstra que mantendo-se a abertura de alimentação constante em 17,5; 32,655 ou 2,345 mm, o percentual de impureza contido na amostra ao final da separação diminui com o aumento da massa de grãos alimentada. Em contrapartida, quando massa de grãos é mantida constante em 200 ou 400 g, o percentual de impureza diminui com a diminuição da abertura de alimentação. Avaliando-se o percentual de perda de grãos tem-se que em aberturas de alimentação médias e baixas (2,345 e 17,5 mm) o aumento da massa de grãos alimentada diminui a perda, entretanto, na maior abertura (32,655mm) a variação da massa de 200 para 400 g representa o dobro da perda (de 0,88 para 1,67%). Além disso, ao manter-se a massa constante (200 ou 400 g), a maior abertura de alimentação resulta em diminuição de perdas.

A Tabela 5.3.2 apresenta a análise de variância (ANOVA) para os modelos propostos para o percentual de impureza restante nos grãos após a separação e o percentual de perda de grãos no módulo experimental, respectivamente.

Tabela 5.3.2: Análise de variância (ANOVA) para o percentual de impureza e perda de grãos obtida a partir dos dados aferidos nos testes com o módulo experimental de bancada.

	% de Impureza					% de Perda				
	SQ	GL	MQ	Fcalc	p-valor	SQ	GL	MQ	Fcalc	p-valor
Regressão	0,0419	5	0,0084	7,85	0,060	240,98	5	48,20	4,80	0,113
Falta de ajuste	0,0018	1	0,0018	2,72	0,241	26,49	1	26,49	14,64	0,062
Erro Puro	0,0014	2	0,0007			3,62	2	1,81		
Resíduo	0,0032	3	0,0011			30,11	3	10,04		
Total SQ	0,0451	8				271,09	8			

SQ = soma quadrática, GL = graus de liberdade, MQ = média quadrática, R² impureza = 0,92898, R² ajustado = 0,81061; R² perda = 0,88892, R² ajustado = 0,70379.

O modelo estatístico desenvolvido, para o percentual de impureza se ajusta satisfatoriamente aos dados experimentais, visto que o p-valor da regressão é menor que o nível de significância (α) de 10% estabelecido, além de não apresentar indício significativo de falta de ajuste (p-valor > 0,1) considerando-se o mesmo α . Porém, quando avaliado o modelo para o percentual de perda percebe-se que, considerando o intervalo de confiança de 90%, a regressão não apresenta significância estatística, além do modelo apresentar indício de falta de ajuste. A principal hipótese que explica os problemas verificados no modelo do percentual de perda é a existência de uma alta dependência entre a velocidade de ar utilizada e a perda de grãos.

Adicionalmente, os valores de R^2 e R^2 ajustado para ambos os modelos ($R^2 = 0,92898$ e R^2 ajustado = $0,81061$ para impureza; $R^2 = 0,88892$ e R^2 ajustado = $0,70379$ para perda) não apresentam proximidade entre si, apesar de serem razoavelmente próximos de 1,0, o que reduz a confiabilidade do modelo. Mesmo com os problemas verificados nos modelos apresentados, uma vez que o objetivo desta etapa do projeto consistia em averiguar a efetividade da separação, bem como, analisar as melhores condições de operação para se utilizar em um posterior protótipo em escala piloto, deu-se continuidade às análises estatísticas.

As tabelas de efeitos para as variáveis resposta (impureza e perda) analisadas são apresentados respectivamente na Tabela 5.3.3 e 5.3.4, bem como os diagramas de Pareto (Figura 5.3.2 e 5.3.3).

Tabela 5.3.3: Efeitos da variável resposta percentual de impureza obtidos a partir dos dados aferidos nos testes com o módulo experimental de bancada.

% Impureza	Efeito	Erro padrão (erro puro)	tcalc.	p-valor
Média/Intersecção	0,107	0,015	7,081	0,019
MG	-0,033	0,015	-2,220	0,157
MG²	0,076	0,012	6,380	0,024
AA	0,043	0,026	1,663	0,238
AA²	0,172	0,036	4,828	0,040
MG.AA	0,010	0,026	0,390	0,734

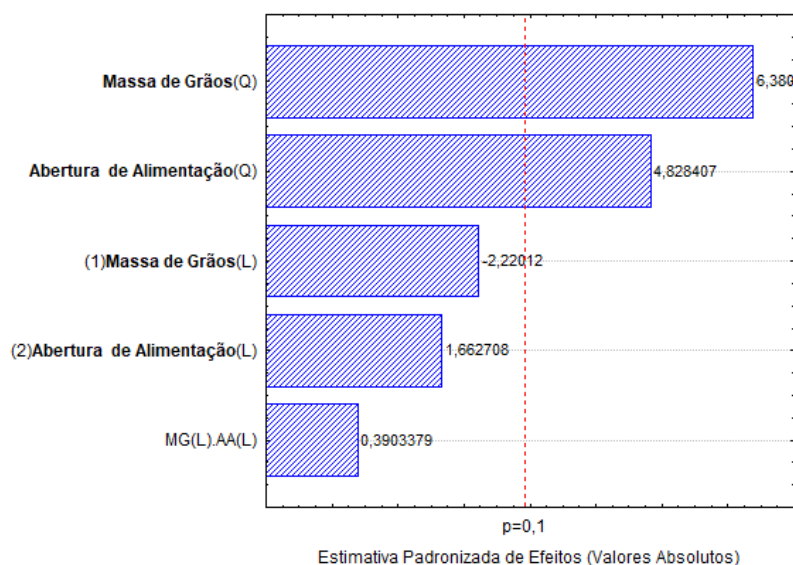


Figura 5.3.2: Diagrama de Pareto para a variável resposta percentual de impureza obtido a partir dos dados aferidos nos testes com o módulo experimental de bancada.

Tabela 5.3.4: Efeitos da variável resposta percentual de perda obtidos a partir dos dados aferidos nos testes com o módulo experimental de bancada.

% Perda	Efeito	Erro padrão (erro puro)	tcalc.	p-valor
Média/Intersecção	3,167	0,777	4,079	0,055
MG	-3,810	0,777	-4,907	0,039
MG ²	0,315	0,614	0,513	0,659
AA	-10,048	1,345	-7,471	0,017
AA ²	5,950	1,842	3,231	0,084
MG.AA	8,806	1,345	6,547	0,023

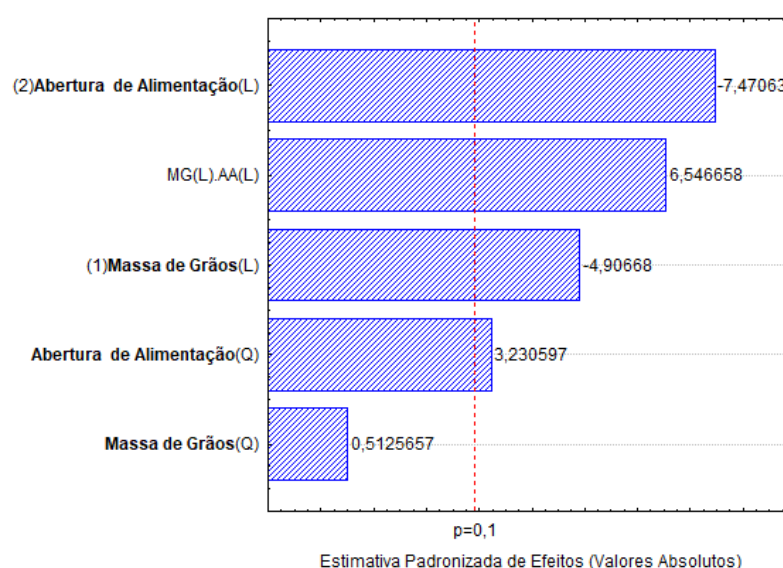


Figura 5.3.3: Diagrama de Pareto para a variável resposta percentual de perda obtido a partir dos dados aferidos nos testes com o módulo experimental de bancada.

Analisando-se os dados na Tabela 5.3.4 e a Figura 5.3.2, observamos que para a resposta percentual de impureza, apenas as variáveis quadráticas (MG², AA²) são significativas no processo com p-valor menor de 0,1. Os efeitos que apresentam valores negativos tanto na Tabela 5.3.4, quanto na Figura 5.3.2 representam tendências opostas às observadas no percentual de impureza, ou seja, durante a transição de valores da variável avaliada entre seu valor máximo e o mínimo ocorre aumento na variável resposta percentual de impureza, enquanto que os valores com sinais positivos representam tendências similares, ou seja, durante a transição de valores da variável avaliada entre seu valor máximo e o mínimo ocorre diminuição no percentual de impureza. Portanto, o aumento no parâmetro massa de grãos linear (MG) causa diminuição no percentual de impureza final da amostra, enquanto o aumento da abertura de alimentação linear (AA) causa aumento no percentual de impureza final. Essas

tendências também foram identificadas na análise primária dos dados experimentais (Tabela 5.3.1) e confirmadas por meio da tabela de efeitos e diagrama de Pareto. No caso do percentual de impureza, a única variável com tendência oposta a variável resposta é a massa de grãos (MG), a qual possui baixa significância no modelo ($p\text{-valor} > 0,1$).

Para o modelo de predição do percentual de perda (Tabela 5.3.5 e Figura 5.3.3) verifica-se significância estatística ($p\text{-valor} < 0,1$) em ordem decrescente para as variáveis lineares AA e MG, e para a interação MG x AA e para a variável quadrática AA^2 . Novamente foram comprovadas as tendências propostas anteriormente de que o percentual de impureza diminui com o aumento da massa de grãos (MG) linear e com uma maior abertura de alimentação (AA) linear, posto que, estas variáveis apresentam correlações negativas na Tabela 5.3.5 e na Figura 5.3.3. Além disso, a abertura de alimentação (AA) tem maior influência no processo de separação em se tratando do percentual de perdas, visto que, $p\text{-valor de AA} < p\text{-valor da MG}$.

Assim, considerando-se um intervalo de confiança de 90%, os termos que se mostraram significativos no caso do modelo de percentual de impureza foram os termos quadráticos, enquanto no caso do percentual de perda, os termos que se mostraram predominantemente significativos foram os termos lineares. Além disso, pode-se verificar que a abertura de alimentação é a variável de operação que mais influenciou no processo de separação, apresentando o termo quadrático, AA^2 , significância para ambos os modelos no intervalo de confiança de 90%.

As Equações 5.3.1 e 5.3.2 fornecem os ajustes para os modelos estatísticos propostos para o percentual de impurezas e o percentual de perda, respectivamente. Também é apresentada a relação gráfica entre os valores observados e o modelo ajustado para ambas as variáveis resposta (Figura 5.3.4 (a) e (b)).

$$\begin{aligned} \text{\% de Impurezas} = & 0,605598 - 0,002502 \text{ MG} + 0,000004 \text{ MG}^2 - 0,012705 \text{ AA} + \\ & + 0,000375 \text{ AA}^2 + 0,000003 \text{ MG.AA} \end{aligned} \quad (5.3.1)$$

$$\begin{aligned} \text{\% de Perda} = & 35,31931 - 0,07933 \text{ MG} + 0,00002 \text{ MG}^2 - 1,65642 \text{ AA} \\ & + 0,01295 \text{ AA}^2 + 0,00291 \text{ MG.AA} \end{aligned} \quad (5.3.2)$$

Em que, MG é a massa de grãos ($100 \leq \text{MG} \leq 500 \text{ g}$) e AA é a abertura da alimentação ($2,345 \leq \text{AA} \leq 32,655 \text{ mm}$).

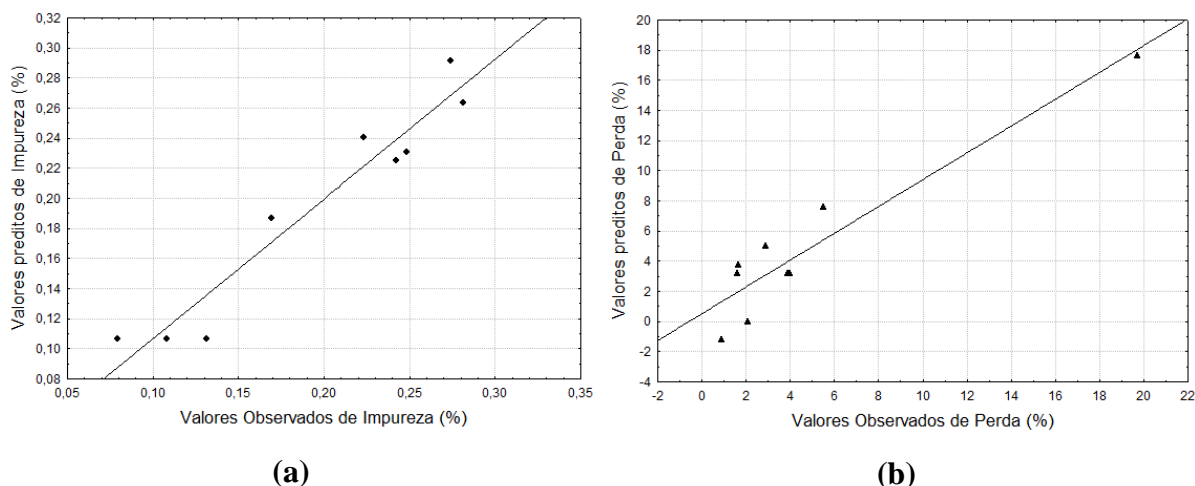


Figura 5.3.4: Relação entre os valores preditos pelo modelo e os valores obtidos experimentalmente, nos testes com o módulo experimental de bancada para o percentual de: a) impureza e b) perda.

O modelo desenvolvido para a predição de percentual de impurezas final na amostra se ajustou melhor aos dados experimentais quando comparado ao modelo desenvolvido para a predição de percentual de perda. Essa diferença pode ser verificada ao comparar-se os coeficientes de determinação de ambas as equações apresentadas, uma vez que, o ajuste representado pela Equação 5.3.1 possui coeficiente de determinação maior que o ajuste representado pela Equação 5.3.2. Isto se deve, como comprovado posteriormente, à forte correlação existente entre as perdas de grãos no processo e a velocidade de ar utilizada na operação, não estudada nesta etapa experimental.

As Figuras 5.3.5 (a) e (b), bem como, as Figuras 5.3.6 (a) e (b) apresentam as relações utilizadas para a análise da distribuição normal dos resíduos para as variáveis percentual de impurezas e percentual de perdas, respectivamente.

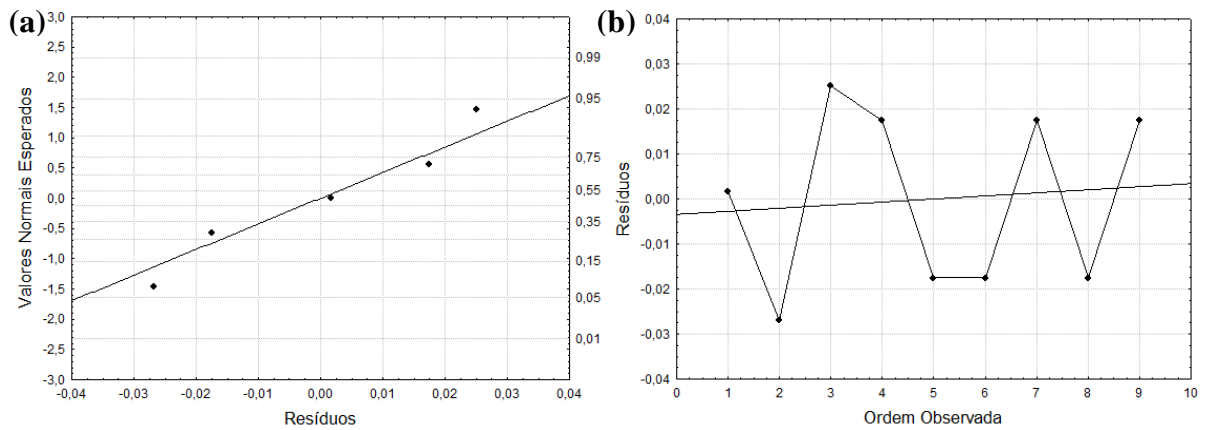


Figura 5.3.5: (a) Relação de Normalidade dos resíduos do percentual de impureza, obtida a partir dos testes com o módulo experimental de bancada; (b) Resíduos de percentual de impureza distribuídos de acordo com a ordem observada experimentalmente, obtidos a partir dos testes com o módulo experimental de bancada.

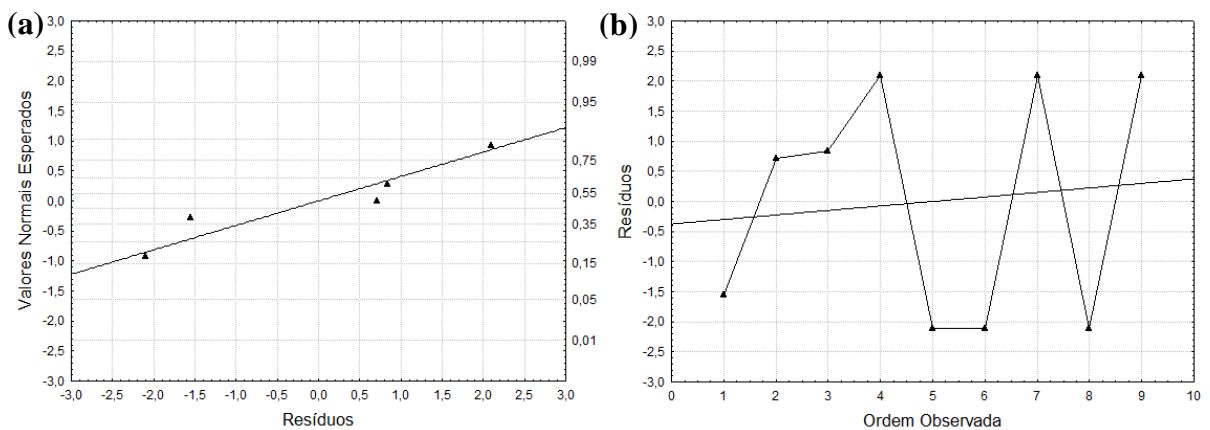


Figura 5.3.6: (a) Relação de Normalidade dos resíduos do percentual de perda, obtida a partir dos testes com o módulo experimental de bancada; (b) Resíduos de percentual de perda distribuídos de acordo com a ordem observada experimentalmente, obtidos a partir dos testes com o módulo experimental de bancada.

Os resíduos demonstram distribuição normal (Figura 5.3.5 (a) e 5.3.6 (a)) para ambos os conjuntos de dados, e não indicam a presença de *outliers*, posto que, em ambos os casos, os resíduos se concentram no intervalo entre 2 e -2. Adicionalmente, observa-se nas Figuras 5.3.5 (b) e 5.3.6 (b) que os resíduos são distribuídos aleatoriamente em torno do zero, ou seja, os dados experimentais apresentam característica de homocedasticidade. Em outras palavras, a variação nas variáveis resposta é a mesma, independentemente dos valores das variáveis de operação (Estrela, 2018).

As superfícies de resposta ajustadas a partir das equações modeladas, assim como seus respectivos gráficos de contorno, para as variáveis resposta percentual de impureza e percentual

de perda são apresentadas na Figura 5.3.7 (a e b) e Figura 5.3.8 (a e b), em que os pontos brancos representam os valores experimentais aferidos nos testes com o módulo experimental de bancada. As superfícies foram centralizadas no ponto central experimental.

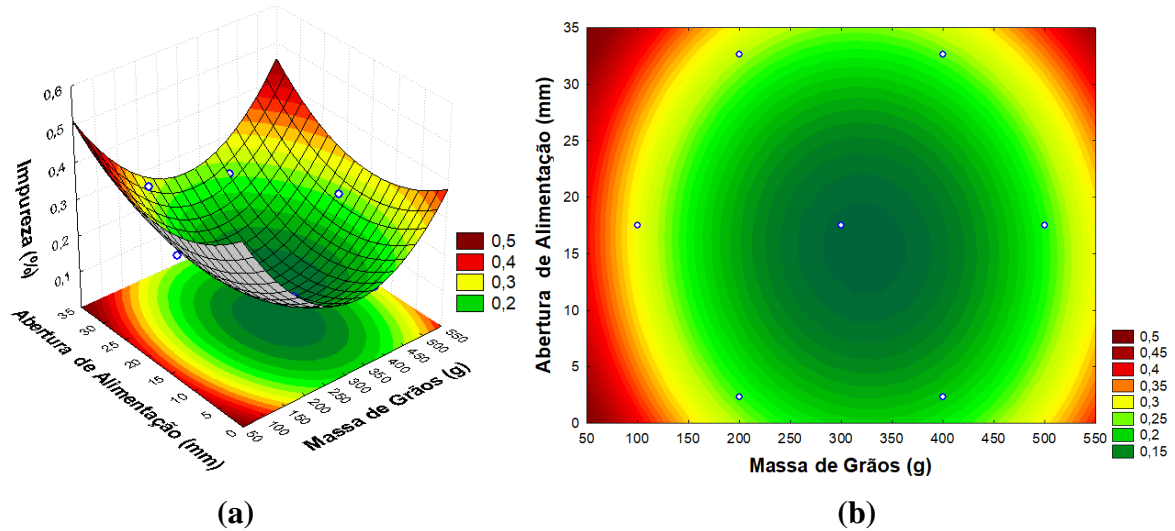


Figura 5.3.7: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de impureza, massa grãos e abertura de alimentação, obtidas com base nos testes com o módulo experimental de bancada.

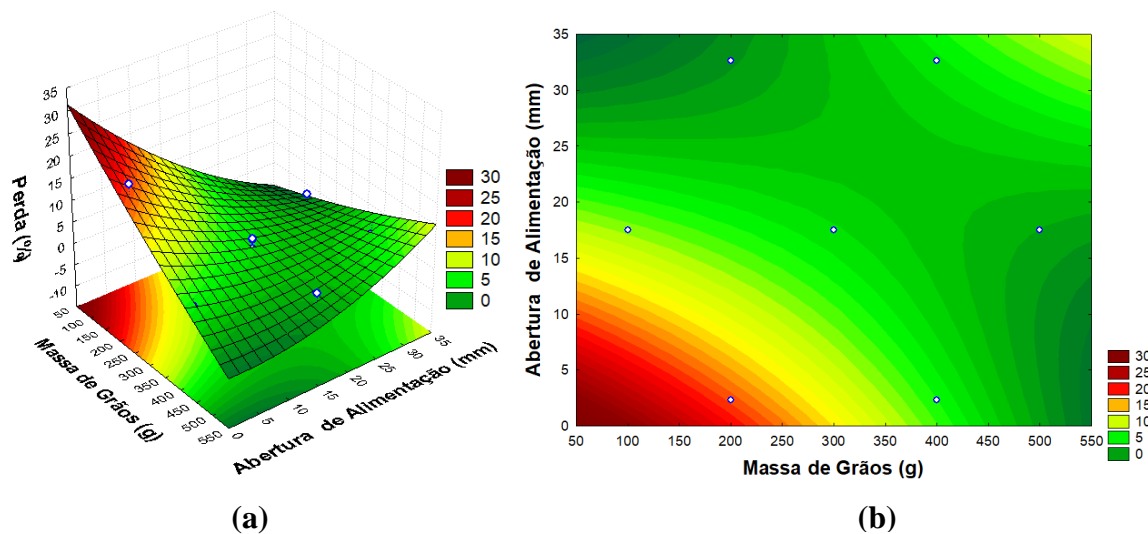


Figura 5.3.8: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de perda, massa grãos e abertura de alimentação, obtidas com base nos testes com o módulo experimental de bancada.

Ao observar-se as superfícies de resposta ajustadas para o percentual de impureza (Figura 5.3.7. (a e b)) verifica-se uma região de mínimo com relação as variáveis de operação massa de grãos e abertura de alimentação no intervalo entre 300 e 350 g e entre 10 e 20 mm, respectivamente. Esse resultado era esperado, posto que, os pontos centrais de operação foram

baseados em testes preliminares de quantidade de impureza em que um ponto de mínimo já havia sido identificado. Quando observadas as superfícies ajustadas para o percentual de perda de grãos (Figura 5.3.8. (a e b)) é possível constatar-se uma região de máximo que ocorre em condições de abertura de alimentação e massa de grãos mínimas. Este comportamento pode ser explicado fisicamente considerando-se que em condições mínimas de abertura, uma menor massa de grãos entra no fluxo de ar, e por consequência, grãos são soprados para fora do equipamento com maior facilidade. Em contrapartida, conforme as variáveis de operação aumentam, mais grãos entram no fluxo de ar ao mesmo tempo, ocorrendo assim, menos perdas. Como resultado, existe uma ampla faixa de operação ótima para a variável resposta percentual de perdas que ocorre a partir do ponto central testado.

As Figuras 5.3.9 (a) e (b) demonstram a superfície ajustada para a função Desejabilidade Global com base nas equações modeladas, além de sua respectiva superfície de contorno, ambas centralizadas no ponto central experimental.

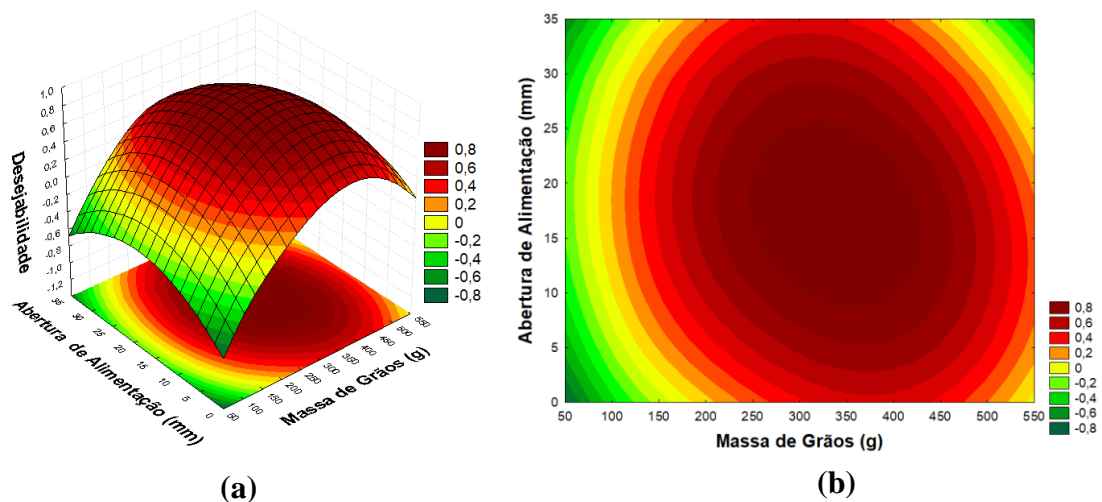


Figura 5.3.9: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas para a função Desejabilidade Global, com base na interação entre as variáveis percentual de impureza e percentual de perda, obtidas a partir dos testes com o módulo experimental de bancada.

A Figura 5.3.9 demonstra uma região ampla na qual ocorre a minimização tanto do percentual de impureza quanto do percentual de perda de grãos, que varia entre 250 e 450 g de massa grãos e entre 10 e 25 mm de abertura de alimentação, abrangendo assim o ponto central experimental.

A Figura 5.3.10 apresenta o perfil dos valores preditos de desejabilidade, no ponto de operação ótimo, para as variáveis massa de grãos e abertura de alimentação.

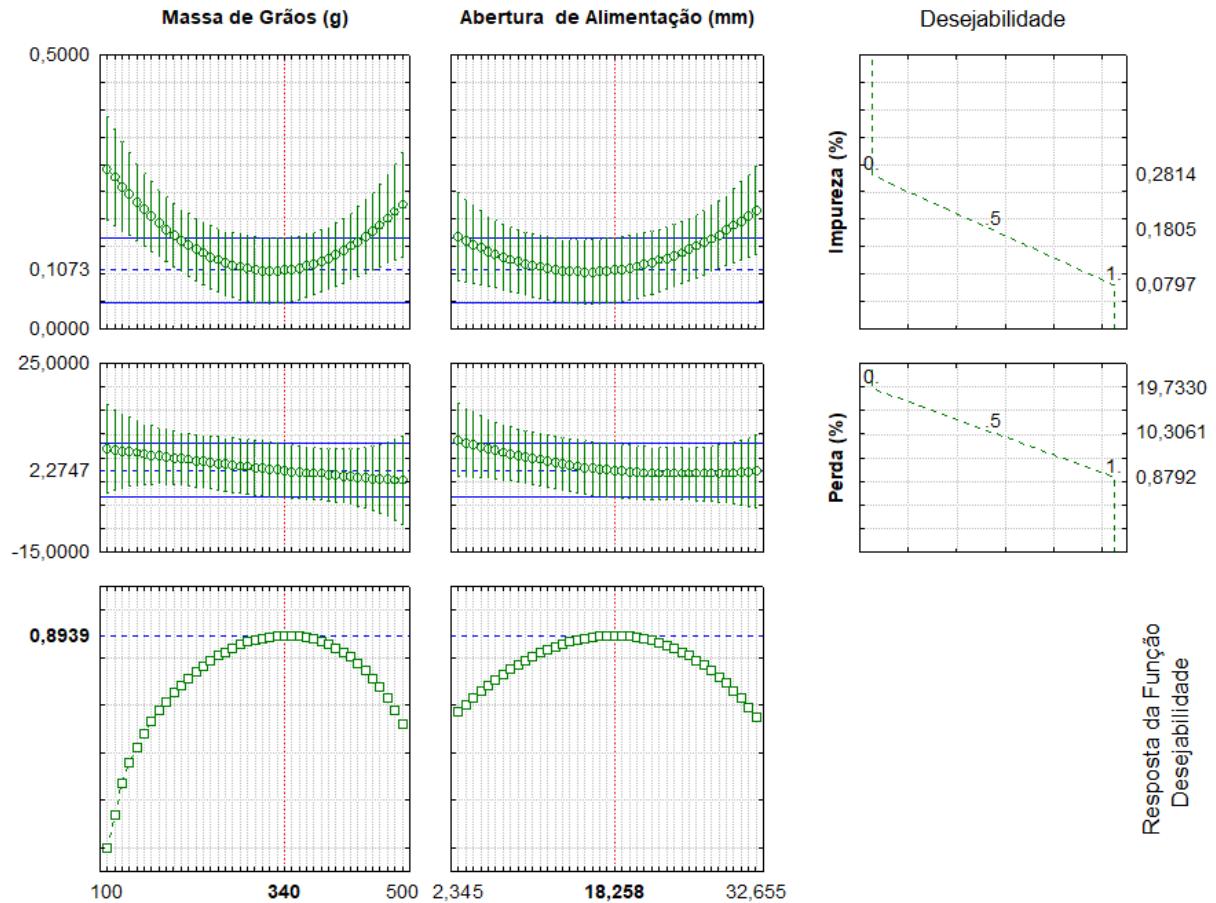


Figura 5.3.10: Condições de operação (valores de massa de grãos e abertura de alimentação) do módulo experimental de bancada que minimizam o percentual de perda e o percentual de impureza no processo de separação.

A função desejabilidade global apresentou bom resultado, visto que, seu valor (0,894) é bastante próximo de 1, no ponto de operação ótima. Adicionalmente, verifica-se ainda que as estimativas iniciais dos pontos centrais se apresentaram em conformidade e proximidade com os valores que minimizam as variáveis resposta percentual de perda de grãos e percentual de impurezas, pois localizam-se na região gráfica em que a desejabilidade global é aferida em 0,8. Além disso, o ponto ótimo de operação do módulo experimental de bancada foi estabelecido em 340 g de massa de grãos e 18,258 mm de abertura de alimentação.

5.4 Problemas observados na operação do módulo experimental de bancada e melhorias aplicadas a construção do protótipo em escala piloto

Conforme o módulo experimental foi operado, foram percebidas algumas possibilidades de melhoramento no *design* estrutural do equipamento, as quais foram posteriormente aplicadas ao projeto do protótipo de forma a otimizar sua operação.

A primeira modificação percebida como necessária foi quanto ao comprimento do módulo experimental. Verificou-se que apesar da separação de impurezas terem apresentado resultados satisfatórios, o percentual de perda de sementes era relativamente elevado. A modificação da velocidade do ar não se apresentava como uma opção viável, isso porque, o módulo foi operado em velocidades médias de ar, consideradas ideais, não apenas devido a estabilidade do soprador, mas também para evitar a dispersão de sujidades e favorecer a possível aplicação do processo de separação a variedades de grãos com características diferentes das do trigo, visto que, possibilita ampla variação de velocidade para mais ou para menos. Assim, optou-se pelo aumento no comprimento da câmara de separação.

A diferença de comprimento entre as câmaras de separação do módulo experimental e do protótipo foi estimada com base na adição de equações ao modelo matemático utilizado no VBA, com esta finalidade. Devido a característica de teste de viabilidade de processo da etapa de construção do módulo experimental, o equacionamento matemático utilizado na simulação não era voltado a ajustes finos, e por isso não levou em consideração as possíveis influências causadas pela presença de fronteiras rígidas (representadas pelas equações 3.4.1.1 a 3.4.1.7) ou de concentração de partícula (equações 3.4.2.1 a 3.4.2.6). Portanto, do modelo matemático simplificado resultou um comprimento de câmara de separação menor (0,25 m) do que a simulada para o protótipo em escala piloto (0,32 m).

A segunda mudança estrutural realizada foi quanto ao formato da câmara de separação. Câmaras de poeira em geral são normalmente estruturadas na forma de um paralelepípedo, contudo, este formato não é o mais indicado do ponto de vista da fluidodinâmica, pois, nos cantos do paralelepípedo formam-se “zonas mortas” em que não existe fluxo de ar. Em câmaras de poeira tradicionais as “zonas mortas” não são um grande problema, uma vez que sua alimentação consiste em partículas pequenas, as quais exigem uma grande modificação na velocidade do ar para decantar nos coletores. Desta forma, os equipamentos deste tipo acabam sendo projetados com grandes dimensões, o que diminui muito a influência destas regiões na separação em si. Entretanto, no caso do equipamento proposto, a separação é rápida por se tratar

de partículas maiores, que apresentam grande amplitude entre suas respectivas velocidades terminais e cujo objetivo não consiste em coletar todas as partículas, mas apenas os grãos. Neste contexto, a influência das regiões em questão poderia ser significativa, assim, se fez necessária sua eliminação. Optou-se, então, por um formato cilíndrico de câmara, a qual possui o diâmetro de mesma medida estabelecida como a medida lateral da câmara do módulo experimental (0,05 m), resultando em área de secção transversal de $0,00196 \text{ m}^2$.

Uma terceira modificação provinda da necessidade de controlar mais precisamente a velocidade do ar insuflado no equipamento foi efetuada. O mesmo soprador foi utilizado em ambos os testes do módulo experimental e do protótipo. Este soprador possuía um mecanismo de regulagem de vazão de ar, contudo, este não era preciso. Posto que o módulo experimental teve o objetivo de meramente testar a viabilidade deste tipo de processamento, como mencionado anteriormente, nesta etapa a velocidade do ar foi mantida constante. Entretanto, uma vez verificada a eficácia da separação pneumática, a avaliação da influência da velocidade do ar no processo se tornou fundamental. Por este motivo, instalou-se no soprador de ar um botão tipo *dimmer*, capaz de controlar a velocidade do ar de maneira mais precisa.

Finalmente, verificou-se ainda o acúmulo de produto que ocorria na base da câmara de armazenamento de grãos do módulo experimental, devido ao formato plano do mecanismo de controle de vazão e da própria base. Como este acúmulo poderia comprometer a capacidade do equipamento de operar continuamente, e por consequência limitar sua operação em larga escala, as modificações estruturais necessárias foram efetuadas. Para solucionar o problema, a base do tanque de armazenamento foi tornada cônica, enquanto o mecanismo de controle de vazão passou a ser uma válvula do tipo borboleta, com trava externa.

5.5 Protótipo em escala piloto

Uma vez que os pontos centrais de operação estimados se mostraram dentro da região de contorno ótima da função desejabilidade global e que houve a necessidade de modificações estruturais no projeto original, optou-se por se manter os mesmos pontos centrais para as variáveis de operação massa de grãos (300 g) e abertura de alimentação (metade da abertura total), de forma que os resultados obtidos com o novo *design* pudessem ser comparados diretamente ao *design* anterior. Entretanto, como o mecanismo de controle de vazão foi modificado, foi preciso modificar também a forma com que sua abertura foi medida. Assim, a Abertura de Alimentação foi aferida de acordo com o ângulo medido entre a válvula totalmente

aberta (90°), que permitia a máxima alimentação de grãos, e o menor ângulo necessário que permitiu a alimentação contínua mínima de grãos (25°). Portanto, a variação máxima no ângulo de abertura foi estabelecida em 65°, e conseqüentemente o ponto central estabelecido em 32,5° desta variação, ângulo que permitiu a abertura da válvula borboleta em metade de seu potencial total de alimentação de grãos.

Adicionou-se ainda uma variável de operação, a velocidade do ar, a qual foi medida com o auxílio de um anemômetro antes de cada batelada de separação, e uma variável resposta, o acúmulo de sementes dentro do equipamento, isso pelo fato de que foi percebido durante a operação do protótipo que parte dos grãos se acumulavam dentro da conjunção em “T”. Verificou-se, também, que era possível variar-se a velocidade entre 5 e 22 m s⁻¹, desta forma, a velocidade de ar do ponto central foi estabelecida em 13,5 m s⁻¹.

A Tabela 5.5.1 apresenta a matriz de Doehlert com triplicata no ponto central e resultados obtidos para as variáveis respostas percentual de impureza (restante na amostra após o processamento), o percentual de perda (grãos soprados para fora do equipamento juntamente com as impurezas) e o percentual de acúmulo de grãos dentro do equipamento. Os códigos de cada valor experimental de acordo com a matriz são apresentados ao lado dos valores reais das variáveis.

Tabela 5.5.1: Valores reais e codificados da matriz de Doehlert e percentuais de impureza, perda e acúmulo avaliados no planejamento experimental dos testes efetuados com o protótipo em escala piloto.

Experimento	Massa de Grãos (g)	Velocidade do ar (m/s)	Abertura de alimentação (°)	% de Impureza	% de Perda	% de Acúmulo
1	300 (0)	13,5 (0)	32,5(0)	0,11	4,75	2,43
2	300 (0)	13,5 (0)	32,5(0)	0,10	5,53	2,60
3	300 (0)	13,5 (0)	32,5(0)	0,13	3,94	2,26
4	500 (1)	13,5 (0)	32,5(0)	0,06	3,79	1,35
5	400 (0,5)	20,9 (0,866)	32,5(0)	0,04	49,61	0,65
6	400 (0,5)	16 (0,289)	59,1 (0,817)	0,07	12,53	2,28
7	100 (-1)	13,5 (0)	32,5(0)	0,11	2,99	3,98
8	200 (-0,5)	6,1 (-0,86)	32,5(0)	0,29	0,36	37,46
9	200 (-0,5)	11 (-0,289)	5,9 (-0,817)	0,13	1,98	31,99
10	400 (0,5)	6,1 (-0,866)	32,5(0)	0,22	0,18	20,89
11	400 (0,5)	11 (-0,289)	5,9 (-0,817)	0,14	1,92	17,71
12	200 (-0,5)	20,9 (0,866)	32,5(0)	0,13	41,40	1,66
13	300 (0)	18,4 (0,577)	5,9 (-0,817)	0,06	37,41	17,91
14	200 (-0,5)	16 (0,289)	59,1 (0,817)	0,06	8,21	3,26
15	300 (0)	8,66 (-0,577)	59,1 (0,817)	0,16	0,29	13,14

Os resultados obtidos demonstram que o percentual de impureza restante nos grãos de trigo ao final da separação foi menor que a margem máxima de 1% em massa, aceita pelas empresas de processamento. Nos experimentos 3 e 4, observa-se que o aumento na massa de grãos, mantendo-se a velocidade de ar e abertura de alimentação constantes, tende a causar diminuição nas três variáveis resposta (percentual de impureza, perda e acúmulo). E ainda, o aumento da velocidade do ar, mantendo-se a massa de grãos e abertura de alimentação constantes, como observado nos pares de experimentos 5 e 10 e 8 e 12, tende a causar a diminuição nos percentuais de impureza e acúmulo, enquanto aumenta o percentual de perda.

A Tabela 5.5.2 apresenta a análise de variância (ANOVA) para o percentual de impureza, percentual de perda e o percentual de acúmulo, respectivamente.

Tabela 5.5.2: Análise de variância (ANOVA) para percentual de impureza restante nos grãos após a separação, perda de grãos e acúmulo no interior do equipamento, obtida a partir dos dados aferidos nos testes com o protótipo em escala piloto.

ANOVA	% de Impureza					% de Perda					% de Acúmulo				
	SQ	GL	MQ	Fcalc	p-valor	SQ	GL	MQ	Fcalc	p-valor	SQ	GL	MQ	Fcalc	p-valor
MG	0,00448	1	0,004481	25,32	0,037	18,65	1	18,65	29,40	0,032369	59,125	1	59,13	2025,67	0,00049
MG ²	0,00097	1	0,000969	5,48	0,144	2,18	1	2,18	3,44	0,204949	0,067	1	0,07	2,30	0,26840
V	0,03734	1	0,037335	210,96	0,005	2686,40	1	2686,40	4235,64	0,000236	919,413	1	919,41	31499,80	0,00003
V ²	0,00859	1	0,008593	48,55	0,02	728,87	1	728,87	1149,20	0,000869	342,861	1	342,86	11746,68	0,00009
AA	5E-06	1	0,000005	0,03	0,88	93,72	1	93,72	147,77	0,006699	526,890	1	526,89	18051,67	0,00006
AA ²	0,002	1	0,001996	11,28	0,078	16,31	1	16,31	25,71	0,036763	319,294	1	319,29	10939,27	0,00009
MG.V	0,00025	1	0,00025	1,41	0,357	17,66	1	17,66	27,84	0,034091	60,623	1	60,62	2077,00	0,00048
MG.AA	0,0005	1	0,000496	2,81	0,236	0,74	1	0,74	1,17	0,391995	0,129	1	0,13	4,41	0,17047
V.AA	0,000	1	0,000	0,430	0,580	34,45	1	34,45	54,31	0,017919	21,916	1	21,92	750,86	0,00133
Regressão	0,0586	9	0,0070	9,27	0,012	3790,02	9	421,11	148,65	0,000016	2131,15	9	236,79	23,80	0,00138
Falta de ajuste	0,0032	3	0,0011	5,94	0,147	12,90	3	4,30	6,78	0,131272	49,68	3	16,56	567,34	0,00176
Erro Puro	0,0004	2	0,0002			1,27	2	0,63			0,06	2	0,03		
Resíduo	0,0035	5	0,0010			14,17	5	2,83			49,74	5	9,95		
Total SQ	0,0621	14				3804,18	14				2180,88	14			
F _{tab} (9;5;0,05)	4,7700					4,77					4,77				
F _{cal} /F _{tab}	1,9436					31,20					5,00				

SQ = soma quadrática, GL = graus de liberdade, MQ = média quadrática, R² impureza = 0,94346, R² ajustado = 0,8417; R² perda = 0,99628, R² ajustado = 0,98957; R² acúmulo = 0,97719, R² ajustado = 0,93614.

A Tabela 5.5.2 mostra, que os modelos desenvolvidos, tanto para o percentual de impureza, quanto para percentual de perda, se ajustam satisfatoriamente aos dados experimentais, visto que o p-valor da regressão é menor que o nível ($\alpha = 0,05$) estabelecido, além de não apresentarem indício significativo de falta de ajuste considerando-se o mesmo α . No entanto, ao avaliar-se o modelo estimado para o percentual de acúmulo, percebe-se que apesar do mesmo apresentar ajuste significativo, este também apresenta falta de ajuste significativa, considerando-se um intervalo de confiança de 95%. Em outras palavras, enquanto as variáveis, percentual de impureza e percentual de perda apresentam uma grande dependência com relação as condições de operação do separador, o percentual de acúmulo depende majoritariamente do *design* do equipamento em si, e por este motivo, esta variável não pode ser ajustada pelo modelo proposto.

Uma regressão para ser considerada significativa para fins de predição, deve apresentar valores de F calculado no mínimo de quatro a cinco vezes maior que os valores de F tabelado (BOX & WETZ, 1973). Desta forma, os resultados (Tabela 5.5.2) referentes aos testes de $F_{\text{calculado}}/F_{\text{tabelado}}$ ($F_{\text{cal}}/F_{\text{tab}}$) para os modelos de Percentual de Perda e Percentual de Acúmulo tem potencial de predizer, contudo, o modelo de Percentual de Impureza inicialmente não cumpriu este requisito. No entanto, existe a possibilidade de eliminar-se as variáveis menos significativas do modelo de forma a tornar a equação mais precisa com relação a realidade do processo, e assim aumentar sua preditividade, desde que, este procedimento não cause prejuízos significativos aos valores de coeficiente de determinação da equação (R^2). Assim, percebe-se na Tabela 5.5.2 que as variáveis abertura de alimentação linear (AA) e a que representa a interação entre a abertura de alimentação e a velocidade do ar (V.AA), demonstram significância baixa no modelo, sendo assim, ambas foram removidas do mesmo, e os resultados deste procedimento foram apresentados na Tabela 5.5.3.

Tabela 5.5.3: Análise de variância (ANOVA) para o percentual de impureza após a retirada das variáveis menos significativas, baseada nos dados aferidos nos testes com o protótipo em escala piloto.

% de Impureza	SQ	GL	MQ	Fcalc	p-valor
MG	0,004481	1	0,004481	25,3200	0,037299
MG ²	0,000969	1	0,000969	5,4771	0,144128
V	0,037335	1	0,037335	210,9637	0,004707
V²	0,008593	1	0,008593	48,5541	0,019980
AA ²	0,001996	1	0,001996	11,2764	0,078394
MG.V	0,000250	1	0,000250	1,4116	0,356750
MG.AA	0,000496	1	0,000496	2,8052	0,235944
Regressão	0,058	7	0,008354	16,288	0,000773
Falta de ajuste	0,003237	5	0,000647	3,6576	0,228533
Erro Puro	0,000354	2	0,000177		
Resíduo	0,004	7	0,001		
Total SQ	0,062071	14			
F _{tab} (7;7;0,05)	3,79				
F_{cal}/F_{tab}	4,3				

SQ = soma quadrática, GL = graus de liberdade, MQ = média quadrática, R² impureza = 0,94216, R² ajustado = 0,88431.

A Tabela 5.5.3 comprova que o novo modelo de regressão é significativo e preditivo, e não apresenta indícios de falta de ajuste a um nível de significância de 5%.

Os efeitos para o percentual de impureza, perda e acúmulo para as variáveis massa de grãos, velocidade do ar e abertura de alimentação são apresentados nas Tabelas 5.5.4, 5.5.5 e 5.5.6. A intensidade dos efeitos das variáveis é mostrada pelos diagramas de Pareto (Figura 5.5.1, 5.5.2 e 5.5.3) para as três variáveis respostas analisadas, com confiança de 95%.

Tabela 5.5.4: Efeitos da variável resposta percentual de impureza obtidos a partir dos dados aferidos nos testes com o protótipo em escala piloto.

% Impureza	Efeito	Erro padrão (erro puro)	t_{calc.}	p-valor
Média/Intersecção	0,113	0,008	14,767	0,005
MG	-0,033	0,007	-5,032	0,037
MG ²	-0,013	0,006	-2,255	0,153
V	-0,167	0,012	-14,525	0,005
V²	0,125	0,018	6,978	0,020
AA ²	-0,052	0,015	-3,358	0,078
MG.V	-0,016	0,013	-1,188	0,357
MG.AA	0,023	0,014	1,675	0,236

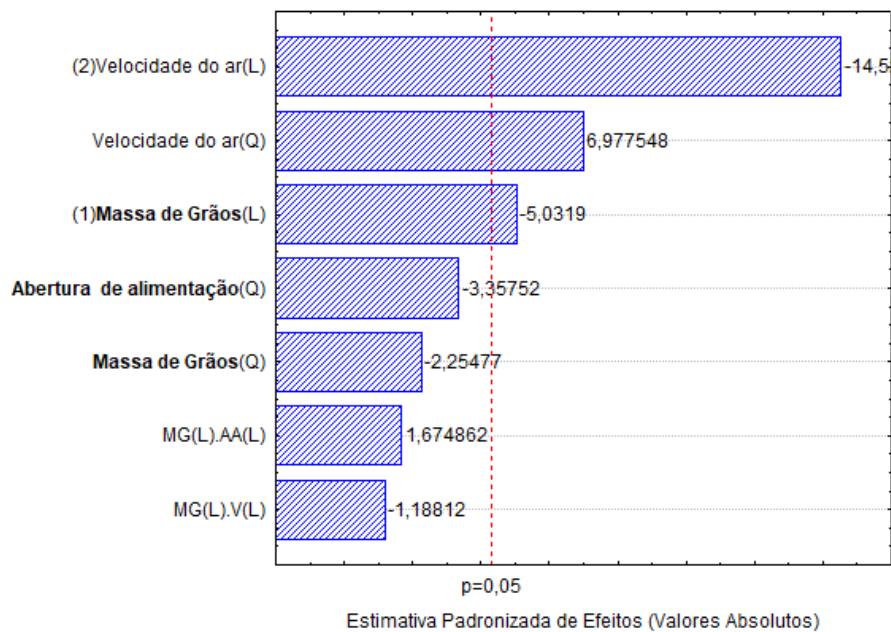


Figura 5.5.1: Diagrama de Pareto para a variável resposta percentual de impureza obtido a partir dos dados aferidos nos testes com o protótipo em escala piloto.

Tabela 5.5.5: Efeitos da variável resposta percentual de perda obtidos a partir dos dados aferidos nos testes com o protótipo em escala piloto.

% Perda	Efeito	Erro padrão (erro puro)	tcalc.	p-valor
Média/Intersecção	4,741	0,460	10,312	0,0093
MG	2,159	0,398	5,422	0,0324
MG ²	-0,674	0,364	-1,854	0,2049
V	44,887	0,690	65,082	0,0002
V²	36,968	1,091	33,900	0,0009
AA	-7,905	0,650	-12,156	0,0067
AA²	4,663	0,920	5,071	0,0368
MG.V	4,202	0,796	5,277	0,0341
MG.AA	-0,909	0,840	-1,083	0,3920
V.AA	-10,714	1,454	-7,370	0,0179

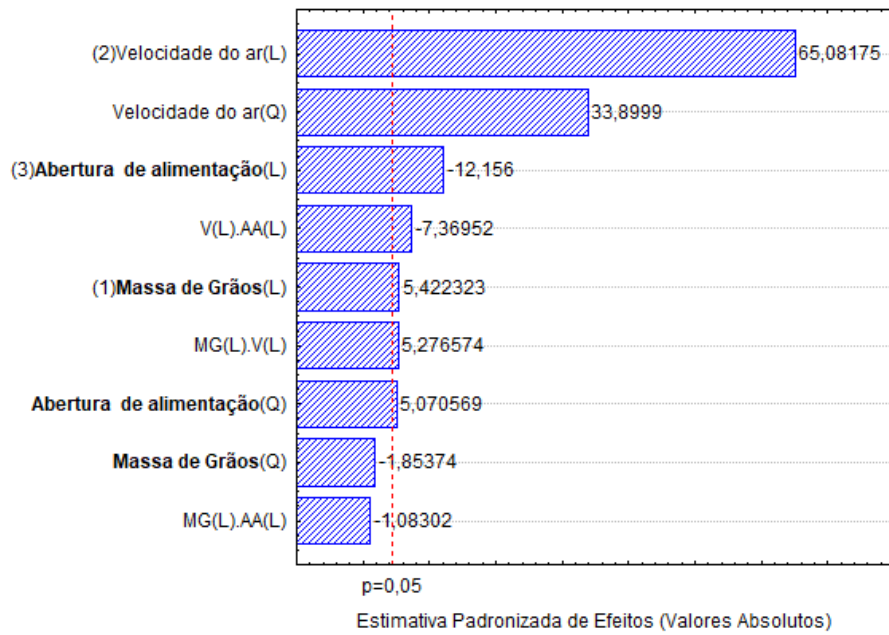


Figura 5.5.2: Diagrama de Pareto para a variável resposta percentual de perda obtido a partir dos dados aferidos nos testes com o protótipo em escala piloto.

Tabela 5.5.6: Efeitos da variável resposta percentual de acúmulo obtidos a partir dos dados aferidos nos testes com o protótipo em escala piloto.

% Acúmulo	Efeito	Erro padrão (erro puro)	tcalc.	p-valor
Média/Intersecção	2,430	0,099	24,631	0,00164
MG	-3,845	0,085	-45,007	0,00049
MG ²	0,118	0,078	1,518	0,26840
V	-26,260	0,148	-177,482	0,00003
V²	25,355	0,234	108,382	0,00009
AA	-18,742	0,139	-134,356	0,00006
AA²	20,633	0,197	104,591	0,00009
MG.V	7,786	0,171	45,574	0,00048
MG.AA	0,378	0,180	2,101	0,17047
V.AA	8,546	0,312	27,402	0,00133

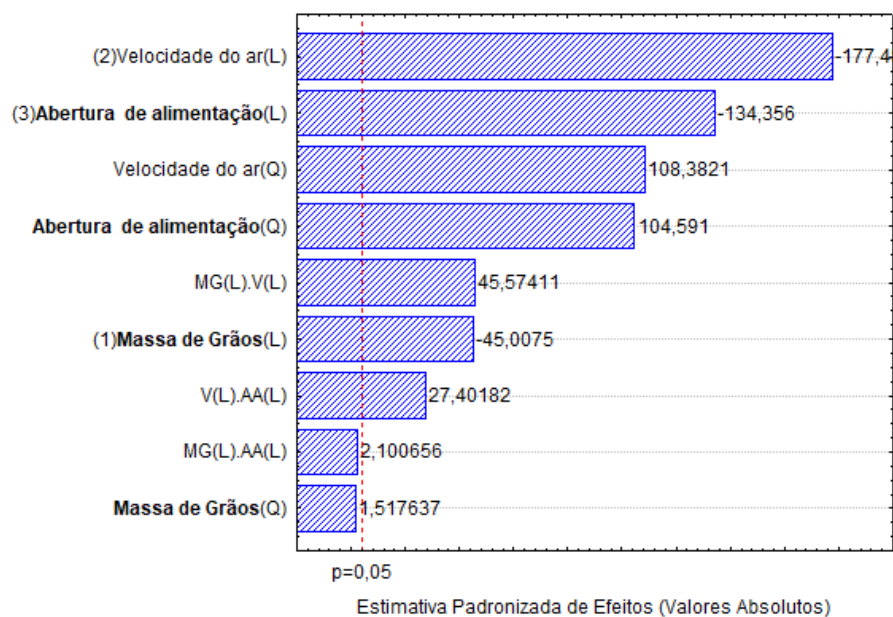


Figura 5.5.3: Diagrama de Pareto para a variável resposta percentual de acúmulo obtido a partir dos dados aferidos nos testes com o protótipo em escala piloto.

A Tabela 5.5.4 e a Figura 5.5.1 demonstram que os termos de velocidade linear (V), massa de grãos linear e quadrática (MG e MG^2), abertura de alimentação quadrática (AA^2) e a interação entre a massa de grãos e a velocidade (MG x V), possuem tendências opostas ao da variável resposta percentual de impureza. Isto é, a transição do valor máximo para o mínimo, das variáveis mencionadas, causa aumento no percentual de impureza. Na Tabela 5.5.5 e a Figura 5.5.2, verifica-se que a transição do valor máximo para o mínimo da massa de grãos quadrática (MG^2), abertura de alimentação linear (AA), do termo de interação entre a velocidade e a abertura de alimentação (V x AA) e no termo de interação entre a massa de grãos e a abertura de alimentação (MG x AA) causa diminuição no percentual de perda. Para a variável resposta percentual de acúmulo (Tabela 5.5.6 e Figura 5.5.3) os termos velocidade de ar linear (V), massa de grãos linear (MG) e abertura de alimentação linear (AA) apresentam tendências opostas, ou seja, a transição do valor máximo para o mínimo das variáveis lineares resulta em aumento no percentual de acúmulo.

Pode ser observado, que os termos que representam a velocidade do ar (V), tanto linear, quanto quadrática (V^2), são parâmetros significativos nos três modelos ajustados. Além disso, as interações entre o termo de velocidade do ar e as variáveis abertura de alimentação (V x AA) e massa de grãos (V x MG) também são significativos nos modelos estabelecidos para o percentual de acúmulo e para o percentual de perda. Isso demonstra a alta influência da relação entre a velocidade do ar e o processo de separação, como esperado, uma vez que a separação é

do tipo pneumática. Adicionalmente, as variáveis massa de grãos quadrática (MG^2) e a interação entre a massa de grãos e a abertura de alimentação ($MG \times AA$) não foram significativos em nenhum dos modelos estatísticos. E ainda, para os modelos estabelecidos para o percentual de perda e para o percentual de acúmulo, todas as variáveis significativas foram as mesmas no processo. Isso ocorre porque ambas as variáveis resposta dependem unicamente da forma de funcionamento do equipamento, enquanto o percentual de impureza varia, também, de acordo com a quantidade de impureza presente na amostra de grãos utilizada.

Com base nas informações apresentadas é possível afirmar que os modelos estabelecidos para o percentual de impureza (após a exclusão dos termos AA e $V \times AA$) e para o percentual de perda possuem regressão significativa, são preditivos e não possuem indícios de falta de ajuste, sendo, portanto, validados pelos dados experimentais ao nível de confiança de 95%. Entretanto, o modelo desenvolvido para o percentual de acúmulo, apesar de apresentar capacidade preditiva e regressão significativa, também apresentou falta de ajuste, e por esse motivo, não foi validado pelos dados experimentais ao mesmo nível de confiança. Mesmo assim, a variável percentual de acúmulo foi incluída nas análises posteriores de desejabilidade, com o intuito de otimizar as condições de operação do protótipo em escala piloto.

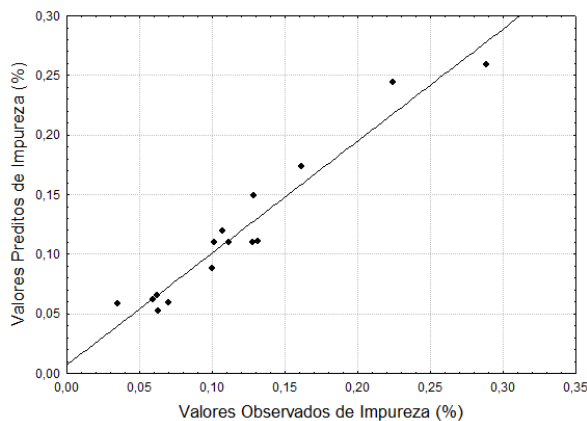
As equações 5.5.1 (da qual foi retirado os termos AA e $V \times AA$, de forma que esta pudesse se ajustar melhor a realidade dos dados experimentais), 5.5.2 e 5.5.3 representam o ajuste obtido para cada modelo estatístico, sendo as relações gráficas entre o modelo e os dados experimentais apresentadas na Figura 5.5.4 (a, b, c).

$$\begin{aligned} \text{\% de Impureza} = & 4,54E-01 + 1,64E-04 MG - 1,00E-06 MG^2 - 3,95E-02 V + \\ & + 1,18E-03 V^2 - 2,90E-05 AA^2 - 1,30E-05 MG.V + 6,00E-06 MG.AA \end{aligned} \quad (5.5.1)$$

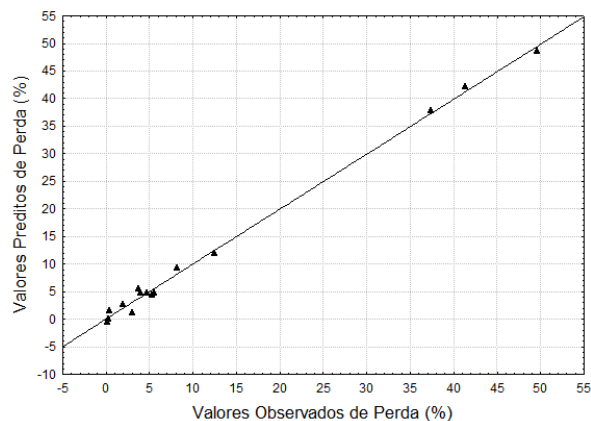
$$\begin{aligned} \text{\% de Perda} = & 25,68 - 0,00196 MG - 0,00003 MG^2 - 6,12715 V + \\ & + 0,34113 V^2 + 0,05759 AA + 0,00331 AA^2 + \\ & + 0,00285 MG.V - 0,00017 MG.AA - 0,02741 V.AA \end{aligned} \quad (5.5.2)$$

$$\begin{aligned} \text{\% de Acúmulo} = & 2,4295 - 3,8446 MG + 0,1183 MG^2 - 26,2595 V + \\ & + 25,3548 V^2 - 18,7419 AA + 20,6331 AA^2 + \\ & + 7,7861 MG.V + 0,3783 MG.AA + 8,5461 V.AA \end{aligned} \quad (5.5.3)$$

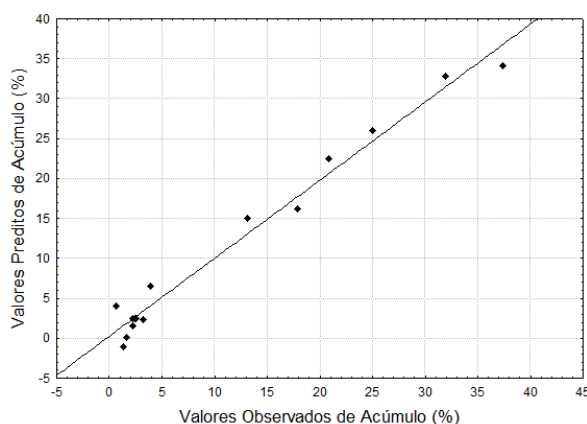
Em que, MG é a massa de grãos ($100 \leq MG \leq 500$ g), AA é a abertura da alimentação ($0^\circ \leq AA \leq 65^\circ$) e V é a velocidade do ar ($5 \leq V \leq 22$ m/s).



(a)



(b)



(c)

Variável resposta:

Percentual de Impureza:

$$R^2 = 0,94216 \quad R^2_{\text{ajus.}} = 0,88431$$

Percentual de Perda:

$$R^2 = 0,99628 \quad R^2_{\text{ajus.}} = 0,98957$$

Percentual de Acúmulo:

$$R^2 = 0,97719 \quad R^2_{\text{ajus.}} = 0,93614$$

Figura 5.5.4: Relação entre os valores preditos pelo modelo e os valores obtidos experimentalmente nos testes com o protótipo em escala piloto para o percentual de: a) impureza; b) perda e c) acúmulo.

Verificou-se que o modelo desenvolvido para a predição de percentual de perdas (Figura 5.5.4(b)) na amostra se ajustou melhor aos dados experimentais quando comparado aos outros dois modelos, comprovando assim, a alta dependência com a velocidade do ar, proposta a partir dos testes com o módulo experimental. Adicionalmente, a Figura 5.5.4(c) apresenta um aglomerado de três pontos em sua porção inferior, o qual poderia explicar a falta de ajuste verificada na análise de variância para o percentual de acúmulo. Esses pontos aglomerados correspondem as triplicatas no ponto central que apresentaram valores experimentais com baixa variação o que pode ter prejudicado o ajuste do modelo aos dados experimentais.

As Figuras 5.5.5 (a) e (b), bem como, as Figuras 5.5.6 e 5.5.7 (a) e (b) apresentam as relações utilizadas para a análise da distribuição dos resíduos para as variáveis percentual de impureza, percentual de perda e percentual de acúmulo, respectivamente.

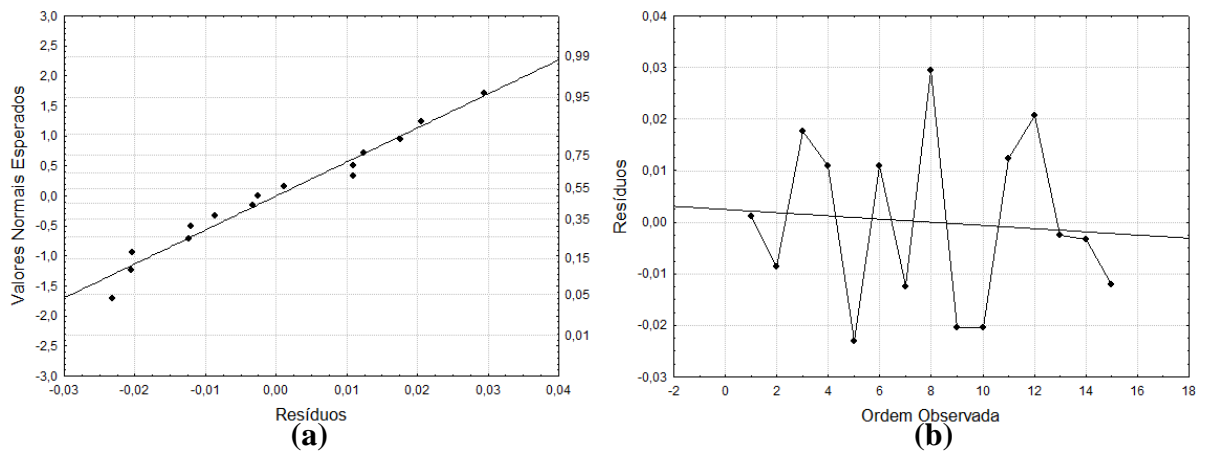


Figura 5.5.5: (a) Relação de Normalidade dos resíduos do percentual de impureza, obtida a partir dos testes com o protótipo em escala piloto; (b) Resíduos de percentual de impureza distribuídos de acordo com a ordem observada experimentalmente, obtidos a partir dos testes com o protótipo em escala piloto.

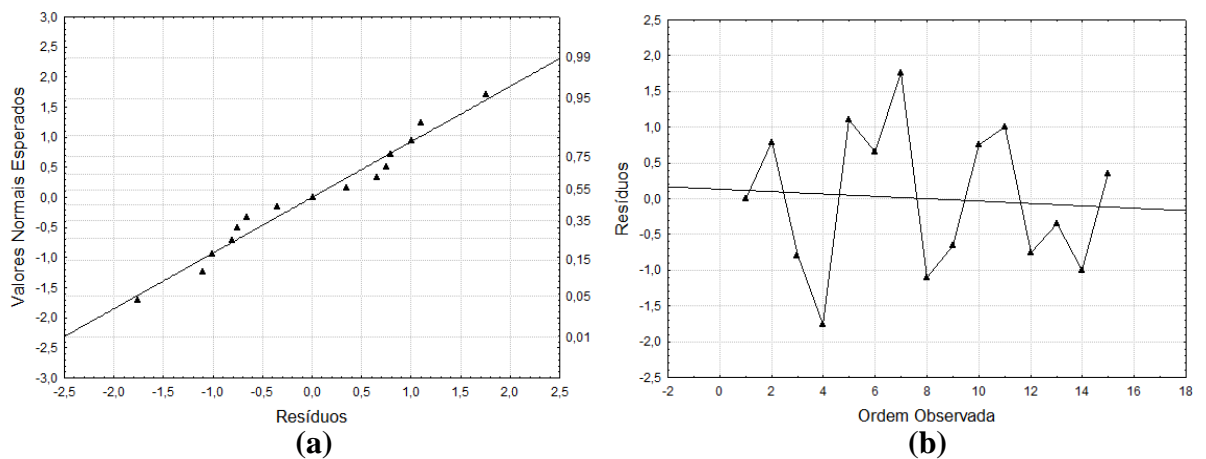


Figura 5.5.6: (a) Relação de Normalidade dos resíduos do percentual de perda, obtida a partir dos testes com o protótipo em escala piloto; (b) Resíduos de percentual de perda distribuídos de acordo com a ordem observada experimentalmente, obtidos a partir dos testes com o protótipo em escala piloto.

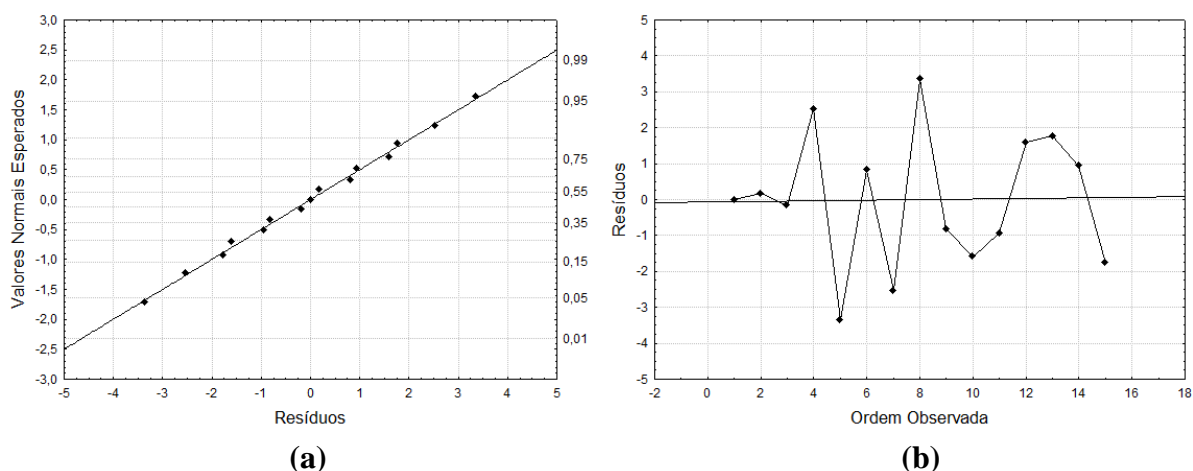


Figura 5.5.7: (a) Relação de Normalidade dos resíduos do percentual de acúmulo, obtida a partir dos testes com o protótipo em escala piloto; (b) Resíduos de percentual de acúmulo distribuídos de acordo com a ordem observada experimentalmente, obtidos a partir dos testes com o protótipo em escala piloto.

Percebe-se que os resíduos demonstram distribuição normal para os três conjuntos de dados, e não indicam a presença de *outliers*, visto que, se concentram no intervalo entre 2 e -2. Assim como ocorreu nos testes com o módulo experimental de bancada, os resíduos se distribuíram aleatoriamente em torno do zero, ou seja, os dados experimentais apresentam característica de homocedasticidade.

As Figuras 5.5.8 a 5.5.16 (a) e (b) apresentam as superfícies ajustadas a partir das equações modeladas, assim como seus respectivos gráficos de contorno, para as três variáveis resposta, em que os pontos brancos representam os valores experimentais aferidos nos testes com o protótipo em escala piloto. As superfícies foram centralizadas no ponto central experimental.

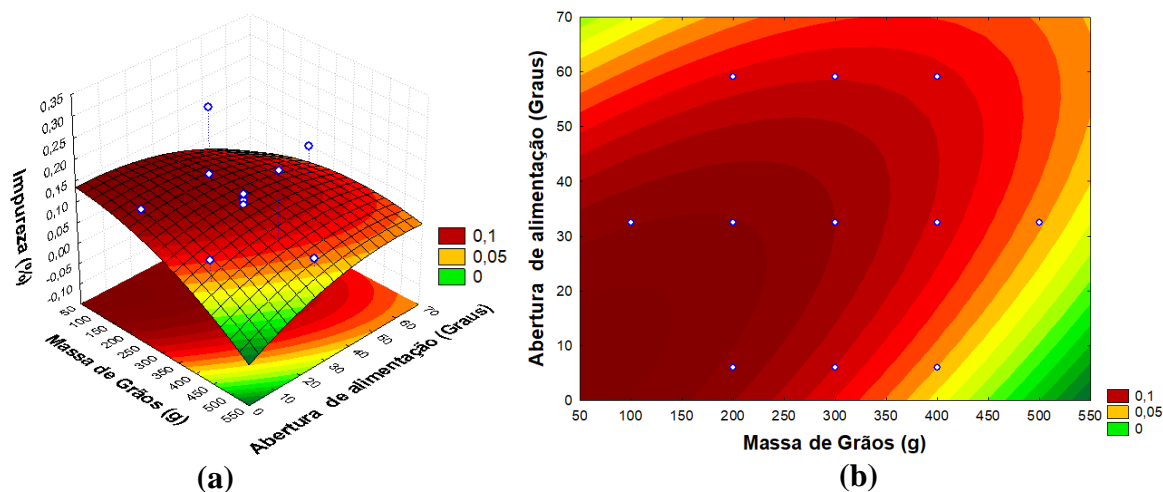


Figura 5.5.8: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de impureza, massa de grãos e abertura de alimentação, obtidas com base nos testes com o protótipo em escala piloto.

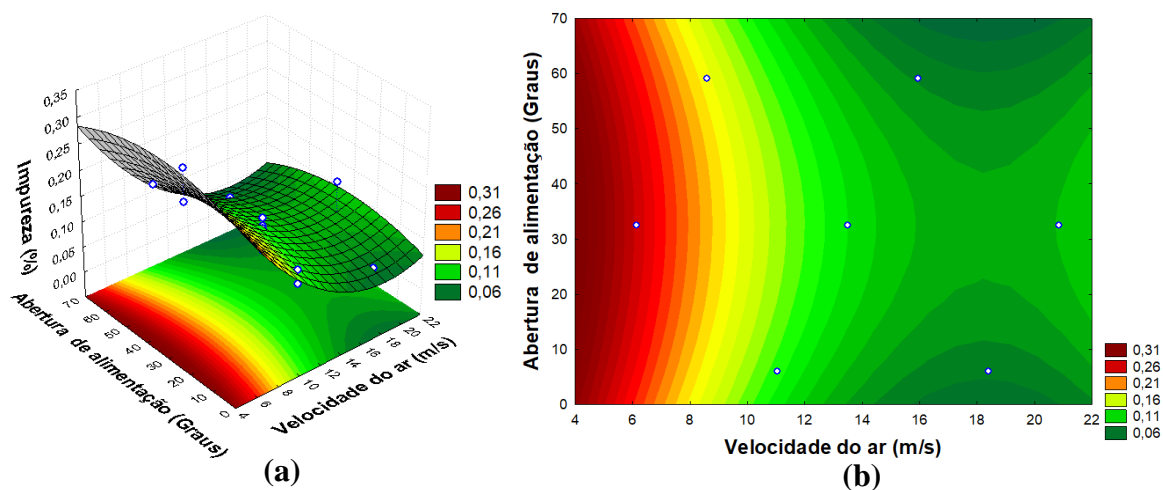


Figura 5.5.9: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de impureza, velocidade do ar e abertura de alimentação, obtidas com base nos testes com o protótipo em escala piloto.

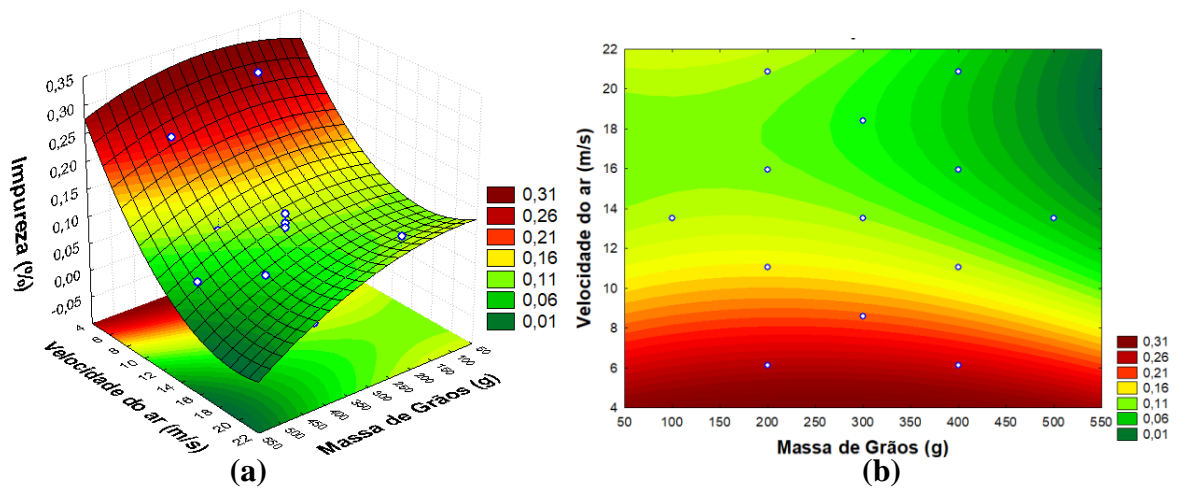


Figura 5.5.10: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de impureza, massa de grãos e velocidade do ar, obtidas com base nos testes com o protótipo em escala piloto.

De acordo com as superfícies apresentadas, foi verificado que as condições de operação que minimizam o percentual de impureza na amostra ocorrem em massa de grãos elevada, velocidade de ar médias e abertura de alimentação reduzidas. Ou seja, quanto menor a abertura de alimentação menos impurezas restam na amostra, desde que exista elevada massa de grãos e velocidade de ar amena, prevenindo-se assim a redispersão das partículas indesejadas nos grãos.

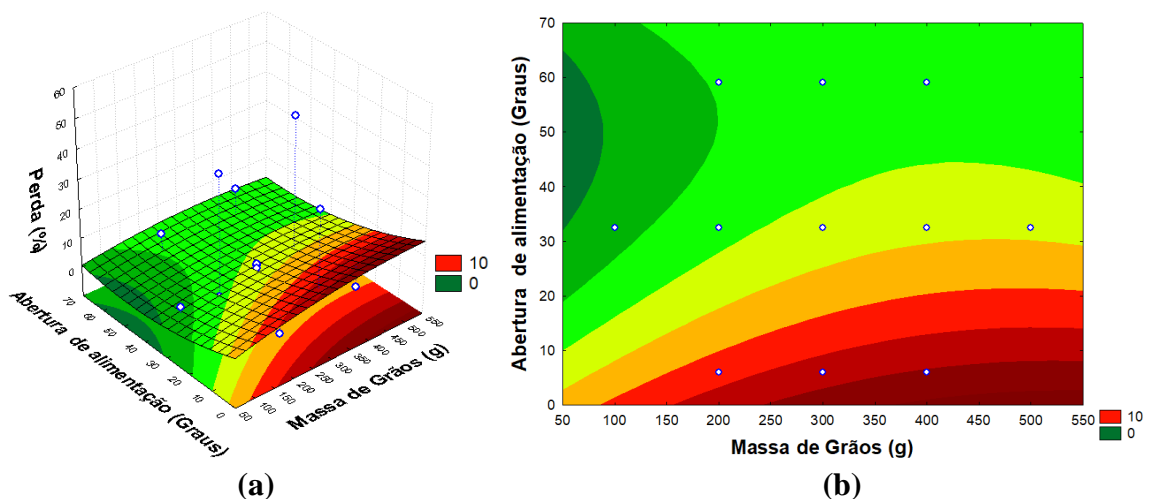


Figura 5.5.11: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de perda, massa de grãos e abertura de alimentação, obtidas com base nos testes com o protótipo em escala piloto.

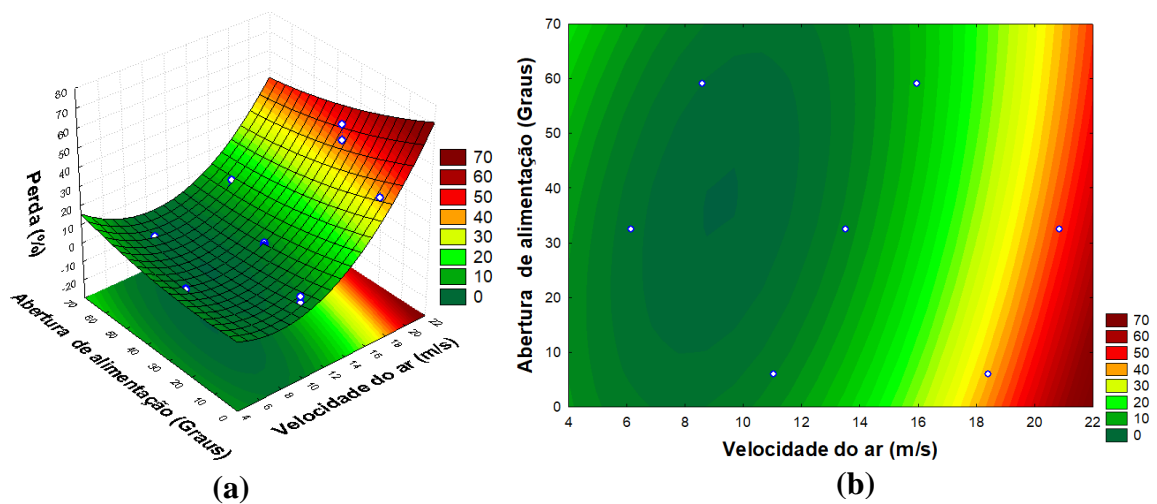


Figura 5.5.12: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de perda, velocidade do ar e abertura de alimentação, obtidas com base nos testes com o protótipo em escala piloto.

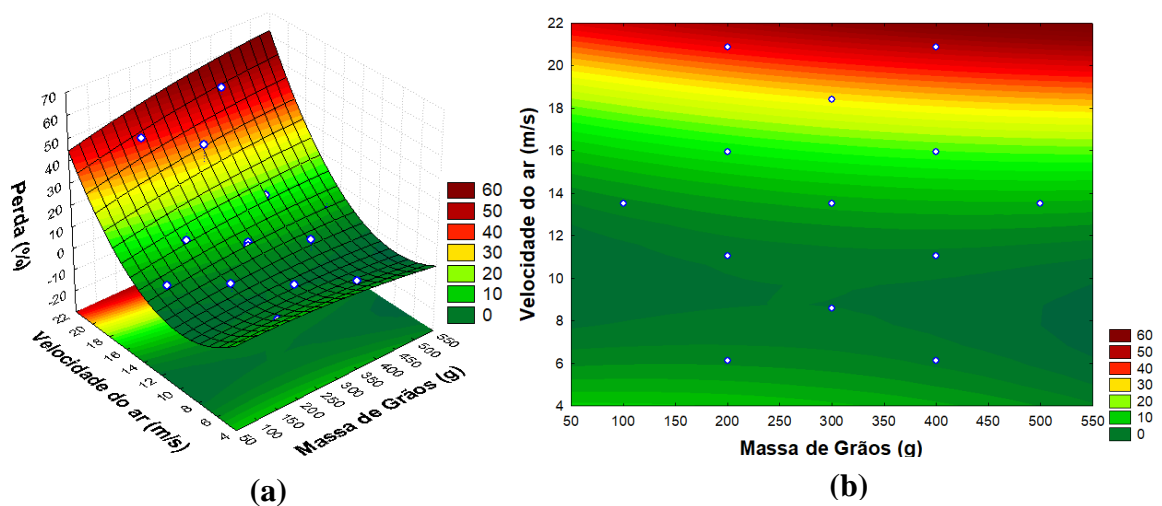


Figura 5.5.13: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de perda, massa grãos e velocidade do ar, obtidas com base nos testes com o protótipo em escala piloto.

Para a resposta percentual de perda, as condições de operação que minimizaram a variável consistem em baixa velocidade de ar, além de abertura de alimentação e massa de grãos em condições entre média e alta. Assim, comprova-se que velocidades reduzidas de ar e maiores quantidades de grãos no fluxo de ar, por meio da ampla abertura de alimentação e quantidades elevadas de massa de alimentação, resultaram em reduzida perda de grãos.

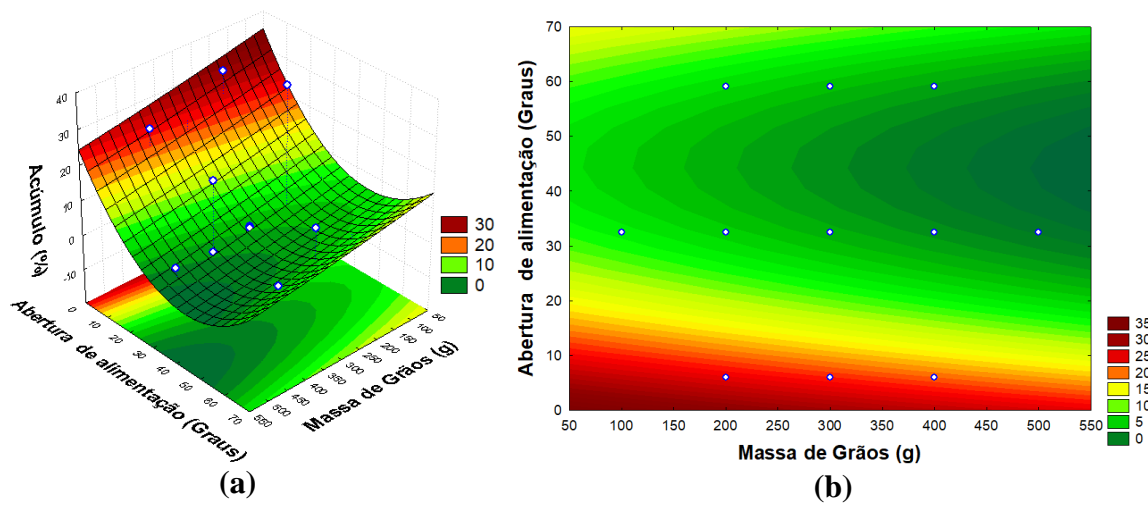


Figura 5.5.14: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de acúmulo, massa de grãos e abertura de alimentação, obtidas com base nos testes com o protótipo em escala piloto.

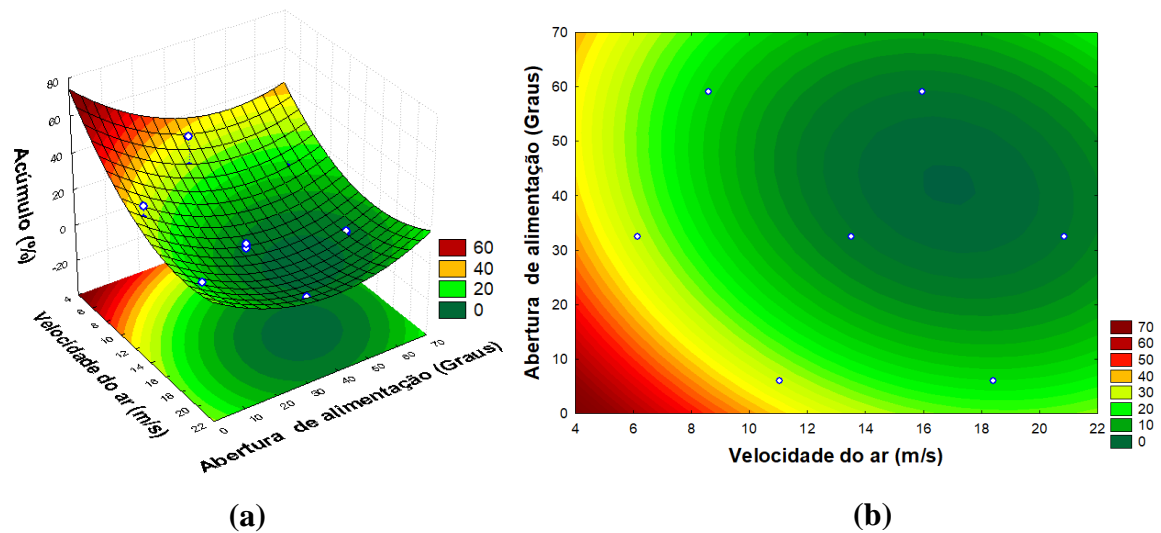


Figura 5.5.15: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de acúmulo, velocidade do ar e abertura de alimentação, obtidas com base nos testes com o protótipo em escala piloto.

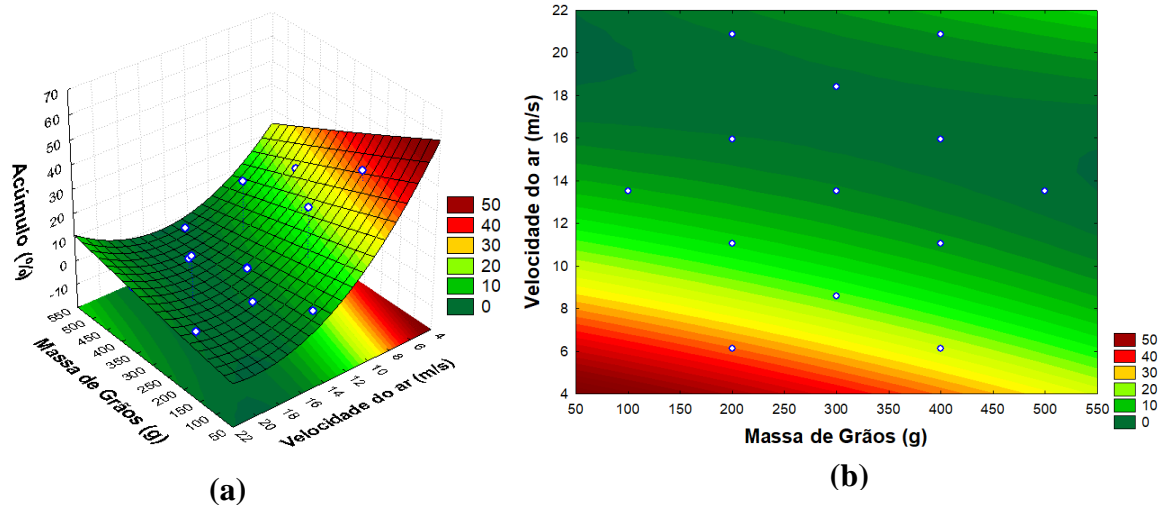


Figura 5.5.16: Superfícies de resposta (a) e de contorno (b) ajustadas a partir da interação entre o percentual de acúmulo, massa de grãos e velocidade do ar, obtidas com base nos testes com o protótipo em escala piloto.

Ao avaliar-se as condições de operação que minimizam o percentual de acúmulo, verificou-se que estas consistem em massa de grãos elevada, velocidade de ar médias e aberturas de alimentação entre média e elevada.

A Figura 5.5.17 demonstra as superfícies de Desejabilidade Global que minimizam as três variáveis resposta. Os gráficos de contorno destas superfícies são apresentados no Apêndice A. A Figura 5.5.18 apresenta o perfil dos valores preditos de desejabilidade, no ponto de ótima operação das variáveis independentes, massa de grãos, abertura de alimentação e velocidade do ar.

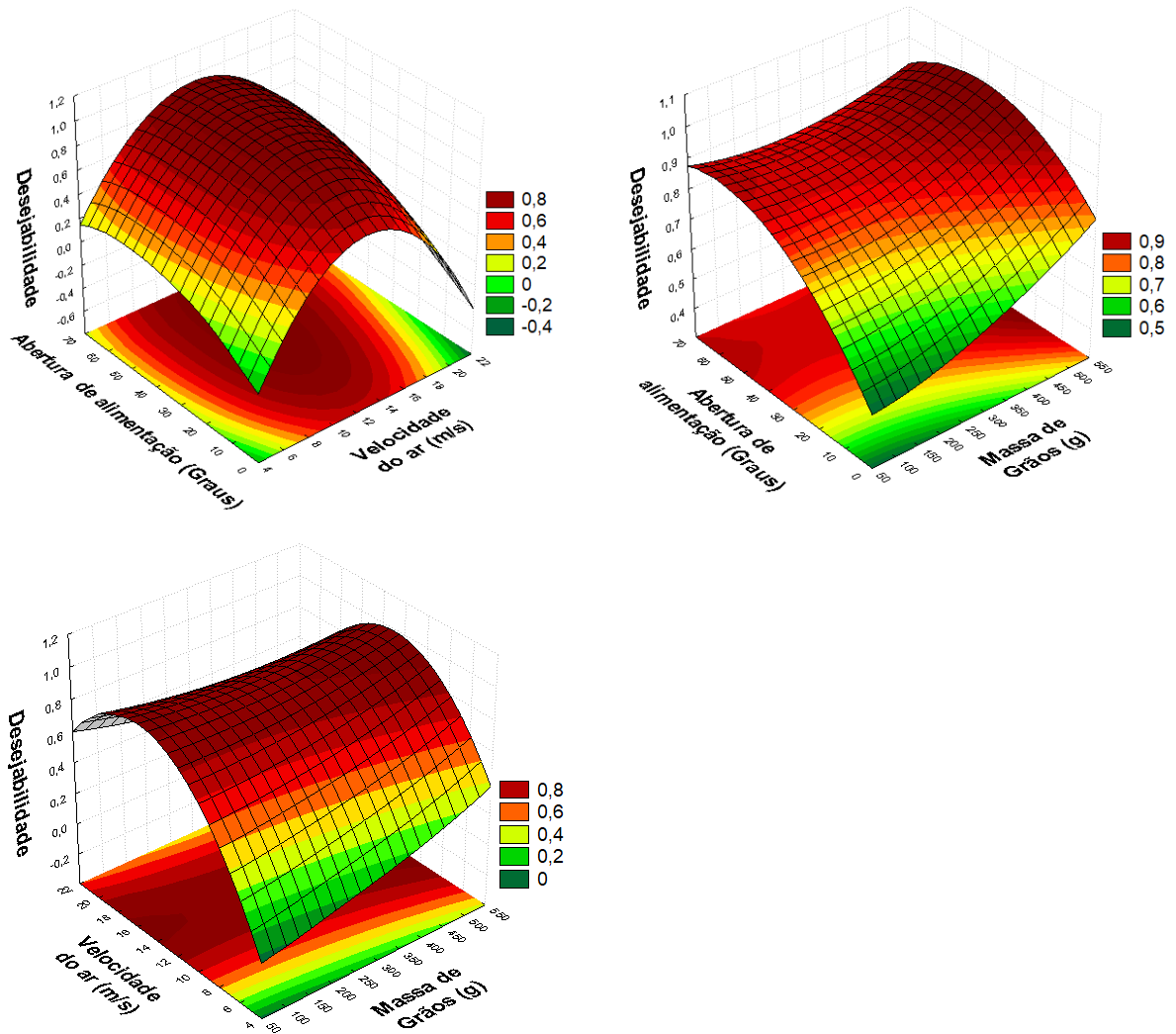


Figura 5.5.17: Superfícies de resposta ajustadas para a função Desejabilidade Global, com base na interação entre as variáveis percentual de impureza, percentual de perda e percentual de acúmulo, obtidas a partir dos testes com o protótipo em escala piloto.

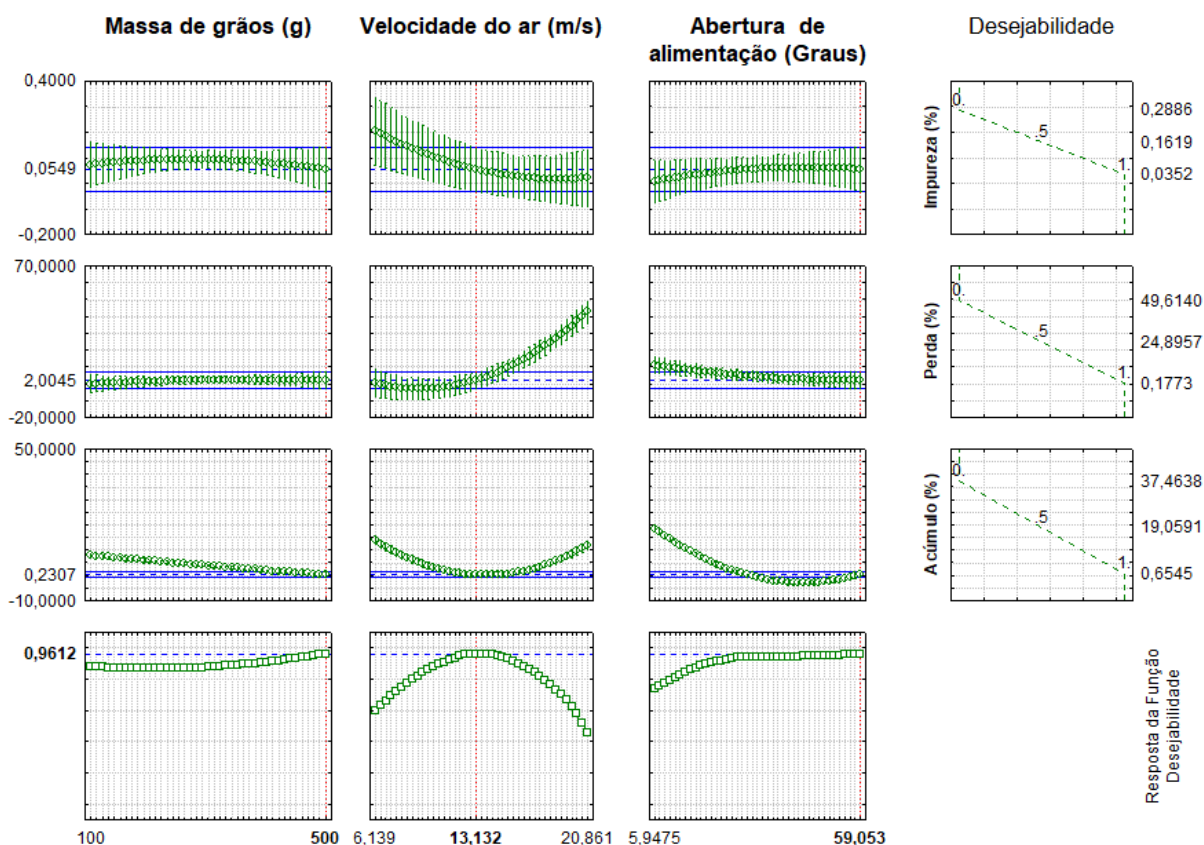


Figura 5.5.18: Condições de operação (valores de massa de grãos, velocidade do ar e abertura de alimentação) do protótipo em escala piloto que minimizam o percentual de impureza, perda e acúmulo no processo de separação.

O perfil traçado para as variáveis de operação alcançou um valor de Desejabilidade Global de 0,9612, o significa que existe uma convergência entre as variáveis para um ponto de operação que minimize as variáveis resposta percentual de impureza, perda e acúmulo. Os pontos de operação sugeridos apresentaram a massa de grãos e abertura de alimentação elevadas, 500 g e 59,06°, respectivamente, enquanto a velocidade de operação permaneceu próxima ao ponto central, em 13,132 m s⁻¹.

As condições estabelecidas pela função desejabilidade foram satisfatórias do ponto de vista físico e operacional, pois o soprador trabalha de forma constante e sem grandes esforços quando operado em velocidades médias de ar, as quais também previnem a redispersão das sujidades entre os grãos. Além disso, o grande fluxo de sementes provido pela ampla abertura de alimentação e quantidade de grãos previne que o fluxo de ar carregue muitos grãos para fora do equipamento, o que evita as perdas e permite agilidade de processamento. Adicionalmente, o equipamento proposto possui *design* simples e de fácil manuseio, de maneira que sua manutenção, conserto e operação é acessível a todos os potenciais usuários, independentemente

de seus níveis de qualificação. E ainda, possui custo de manutenção e operação baixos. Como seu princípio de separação é baseado na velocidade terminal das partículas a serem separadas, não existe a necessidade da utilização de peneiras em sua estrutura. Esta modificação simples elimina os principais problemas existentes nos equipamentos amplamente utilizados na atualidade, bem como, nas novas tecnologias que vêm sendo propostos por outros inventores ao longo dos anos. Então, o equipamento proposto vem ao encontro da demanda de produtores rurais por tecnologias baratas que agreguem valor ao produto em sua comercialização, reunindo, assim, condições potenciais de fabricação e comercialização inéditas.

6. Conclusão

A partir dos resultados obtidos, tanto com o módulo experimental, quanto com o protótipo em escala piloto, é possível concluir que o desenvolvimento de um sistema de pré-limpeza de grãos de trigo voltado ao mercado de pequenos agricultores foi bem sucedido, posto que, o equipamento proposto possui *design* simples e compacto, com baixo custo de manutenção e operação e foi capaz de atingir níveis bastante inferiores de impureza ao aceito pelas empresas processadoras de grãos (1% em massa) durante as fases de teste.

A interface desenvolvida em VBA foi capaz de prever satisfatoriamente as dimensões do equipamento, ante às condições de entrada propostas. Esta etapa do estudo permitiu uma ampla análise prévia das condições necessárias para o bom desempenho do equipamento sem que fosse necessário grandes dispêndios com materiais ou tempo, além de prover a possibilidade de prever o comportamento da separação pneumática aplicada a outras qualidades de grãos.

Quanto ao módulo experimental, este permitiu verificar a eficácia da separação, além de demonstrar as falhas no *design* original, as quais foram corrigidas posteriormente na escala piloto. Adicionalmente foi possível determinar, por meio do planejamento experimental, as condições de operação (massa de grãos: 340 g; abertura de alimentação: 18,258 mm) que inicialmente favoreciam o processo de separação, bem como, minimizavam a perda de grãos.

Com base nos resultados em escala de bancada, o protótipo foi concebido aplicando-se melhorias no comprimento e formato da câmara de separação, no mecanismo de controle de vazão de grãos e ajuste fino no controle de velocidade. Estas modificações permitiram maior controle sobre o processamento em si, e por consequência melhor capacidade de predição dos modelos utilizados para ajustar os dados experimentais obtidos. Assim, os modelos puderam fornecer as condições de operação que minimizavam simultaneamente os percentuais de impurezas, perda e acúmulo de grãos (massa de grãos: 500 g; abertura de alimentação: 59,06°, e velocidade do ar: 13,132 m s⁻¹). Em outras palavras, o protótipo construído, cujas condições ótimas de operação são conhecidas, é totalmente funcional e tem potencial de aplicação real, constituindo um recurso ferramental de grande significância para a agricultura familiar.

7. Sugestões para Trabalhos Futuros

Com base nos resultados obtidos no presente estudo, algumas sugestões são apresentadas para o desenvolvimento de trabalhos futuros que tornariam o equipamento apto a comercialização:

- Verificar a efetividade do equipamento de separação no processamento das demais culturas comumente produzidas no país;
- Averiguar a reprodutibilidade dos resultados de separação por meio da simulação da fluidodinâmica no interior da câmara de separação, utilizando um *Software* como o Comsol;
- Simular condições operacionais extremas no equipamento para diferentes volumes de grãos a serem processados;
- Buscar parceria com agroindústrias para subsidiar a construção do equipamento em escala industrial, de modo a testar a aplicabilidade do equipamento no processo de separação.

8. Referências

- ACEVEDO, E., SILVA, P.; SILVA, H. Wheat growth and physiology. Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: Março 2018.
- ALLEN, T. Particle Size Measurement. 3 ed. Londres: **Chapman & Hall**, 1981.
- ALVES DE SOUSA, C. N. & CAIERÃO, E. Cultivares de Trigo Indicadas para Cultivo no Brasil e Instituições Criadoras 1922 a 2014. 2 ed. Brasília: **Embrapa**, 2014.
- ABITRIGO, 2018. Associação Brasileira da Indústria do Trigo. Disponível em: <<http://www.abitrigo.com.br>> Acesso em 2018.
- BANKS, J.; CARSON, J. S. Discrete-Event System Simulation. Nova Jersey: **Prentice Hall**, 1984.
- BARROS NETO, B.; SPACINO SCARMINIO, I.; BRUNS, R. E. Como fazer experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria. 3 ed. Campinas(SP): **Editora UNICAMP**, 2007.
- BIRNBAUM, D. Microsoft Excel VBA Programing for Absolute Beginner. Boston: **Thomson Course Technology PTR**, 2005.
- BOX, G. E. P. & WETZ, J. Criteria for judging adequacy of estimation by an approximate response function. Wisconsin: **University of Wisconsin Technical Report**, 1973.
- CALDAS, L. F. S.; de PAULA, C. E. R.; BRUM, D. M.; CASSELLA, R. J. Application of a four-variables Doehlert design for the multivariate optimization of copper determination in petroleum-derived insulating oils by GFAAS employing the dilute-and-shot approach. **Fuel**, p. 503 - 5011, 2013.
- CHEREMISINOFF, N. P. Handbook of Chemical Processing Equipment. **Butterworth-Heinemann**, 2000.
- CORRÊA, P. C.; RIBEIRO, D. M.; RESENDE, O.; BOTELHO, F. M. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo, durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 10 ed., v. 3, p. 665 - 670, 2006.
- CREMÁSCO, M. A. Operações Unitárias em Sistemas Particulados. 2 ed. **Blucher**, 2014.
- ESPAENET. European Patent Office. Disponível em: <<https://worldwide.espacenet.com>> Acesso em: Janeiro 2019.
- ESTRELA, C. Análise de Regressão Multipla e sua Aplicação na Odontoloia. Metodologia Cinética: Ciência, Ensino e Pesquisa. Porto Alegre: **Artes Médicas**, p. 197 - 254, 2018.
- FAO. Women in agriculture: closing the gender gapfor development. **The State of Food and Agriculture 2010–11**, 2011.

FAO. The future of food and agriculture: Trends and challenges. 2017.

FAO. Staple foods: What do people eat?. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/u8480e/U8480E07.HTM>>. Acesso em: Fevereiro 2019.

FILHO, P. J. d. F. Introdução a Modelagem e Simulação de Sistemas: com Plicação em Arena. 2 ed. Florianópolis: **Visual Books Ltda**, 2008.

FPO. Free Patents Online. Disponível em: <<http://www.freepatentsonline.com>>. Acesso em: Janeiro 2019.

GOMIDE, R. Operações Unitárias: Separações Mecânicas. Edição do Autor. São Paulo(SP) , 1980.

GOMIDE, R. Operações Unitárias: Operações com Sistemas Sólidos Granulares. Edição do Autor. São Paulo, 1983.

GOOGLE. Google Patents. Disponível em: <<https://patents.google.com>> Acesso em: Fevereiro 2019.

GUIMARÃES B. & TELIS-ROMERO J. Avaliação das Propriedades Físicas do Grão de Trigo em Função do Teor de Umidade. São Paulo: **COBEC e ENBEQ**, 2018.

HIMMELBLAU, D. M. & BISCHOFF, . K. B. Process Analysis and Simulation: Deterministic Systems. Nova York: **John Wiley & Sons, Inc.**, 1968.

INPI. Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Disponível em: <<https://gru.inpi.gov.br>> Acesso em: Março 2019.

LUCAS, H. FAO. 2012. Disponível em: <[http://www.fao.org/docs/eims/upload/306175/Briefing%20Paper%20\(3\)-Wheat%20Initiative%20-%20H%C3%A9%20Lucas.pdf](http://www.fao.org/docs/eims/upload/306175/Briefing%20Paper%20(3)-Wheat%20Initiative%20-%20H%C3%A9%20Lucas.pdf)> Acesso em: Maio 2019.

MACINTYRE, A. J. Ventilação Industrial e Controle de poluição. 2 ed. Rio de Janeiro(RJ): **LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A**, 1990.

MASSARANI, G. Fluidodinâmica em Sistemas Particulados. Rio de Janeiro(SP): **Editora UFRJ**, 1997.

MASSARANI, G. Fluidodinâmica em Sistemas Particulados. Rio de Janeiro: **e - papers**, 2002.

MATOS SCHEUER, P.; DE FRANCISCO, A.; ZAVARIZ DE MIRANDA, M.; LIMBERGER, V. M.; Trigo: Características e Utilização na Panificação. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 11, fasc.13, 2 ed., p. 211 - 222, 2011.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Regras para Análise de Sementes. Primeira ed. Brasília: **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária**: Mapa/ACS, 2009.

MONTGOMERY, Donald C.; RUNGER, George C. Estatística Aplicada e probabilidade para Engenheiros. 5ª ed. São Paulo(R.J.): **LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A**, 2013.

MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of experiments. 8 ed. Nova York: **John Wiley & Sons Inc.**, 2013.

MOREIRA, M. F. P. Operações Unitárias da Engenharia Química Utilizando Excel. Rio de Janeiro: **e - papers**, 2017.

PEGDEN, D. C.; SADOWSKI, R. P.; SHANNON, R. E. Introduction to Simulation Using SIMAN. 2 ed. Nova York: **McGraw-Hill, Inc.**, 1995.

PORTAL PARANÁ COOPERATIVO. Sistema OCEPAR, 2013. Disponível em: <<http://www.paranacooperativo.coop.br>>. Acesso em: Agosto 2018.

PRADELLE, F.; LEAL BRAG, S.; FONSECA DE AGUIAR MARTINS, A. R.; TURKOVICS, F.; CHAAR PRADELLE, R. N. Modeling of Unwashed and Washed Gum Content in Brazilian Gasoline–Ethanol Blends during Prolonged Storage: Application of a Doehlert Matrix. **Energy & Fuel**, p. 6381 - 6394, 2016.

RODRIGUES, M. & IEMMA, A. Planejamento de Experimentos & Otimização de Processos. 2 ed. Campinas (SP): **Cárta**, 2009.

SARAMAGO, S. P.; STEFFEN JR, V.; DUARTE SILVA, J.; de FÁTIMA PEREIRA SARAMAGO, S. Planejamento de Experimentos e Otimização de Sistemas Mistos. **FAMAT**, p. 231 - 245, 2008.

SILVA NUNES, J. A.; ANGELO, J.; ORMOND, A. T.; CANEPPELE, C.; SOARES DA SILVA, S. L.; JOB, M. T. Determinação do ângulo de repouso, volume unitário, eixos ortogonais e esfericidade de trigo. **Acta Iguazu**, 3 ed., v. 2, p. 77 - 86, 2014.

SINDITRIGO-PR & FIEP, 2011. Sistema Fiepr. Disponível em: <<http://www.fiepr.org.br>>. Acesso em: Agosto 2018.

TAKEITI, C. Y. Agência Embrapa de Informação Tecnológica - Ageitec. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: Agosto 2018.

WANG, L. K.; PEREIRA, N. C.; HUNG, Y.-T. Air Pollution Control Engineering. Nova Jersey: **Humana Press Inc**, 2004.

Apêndice A – Gráficos de contorno da função desejabilidade para o protótipo em escala piloto

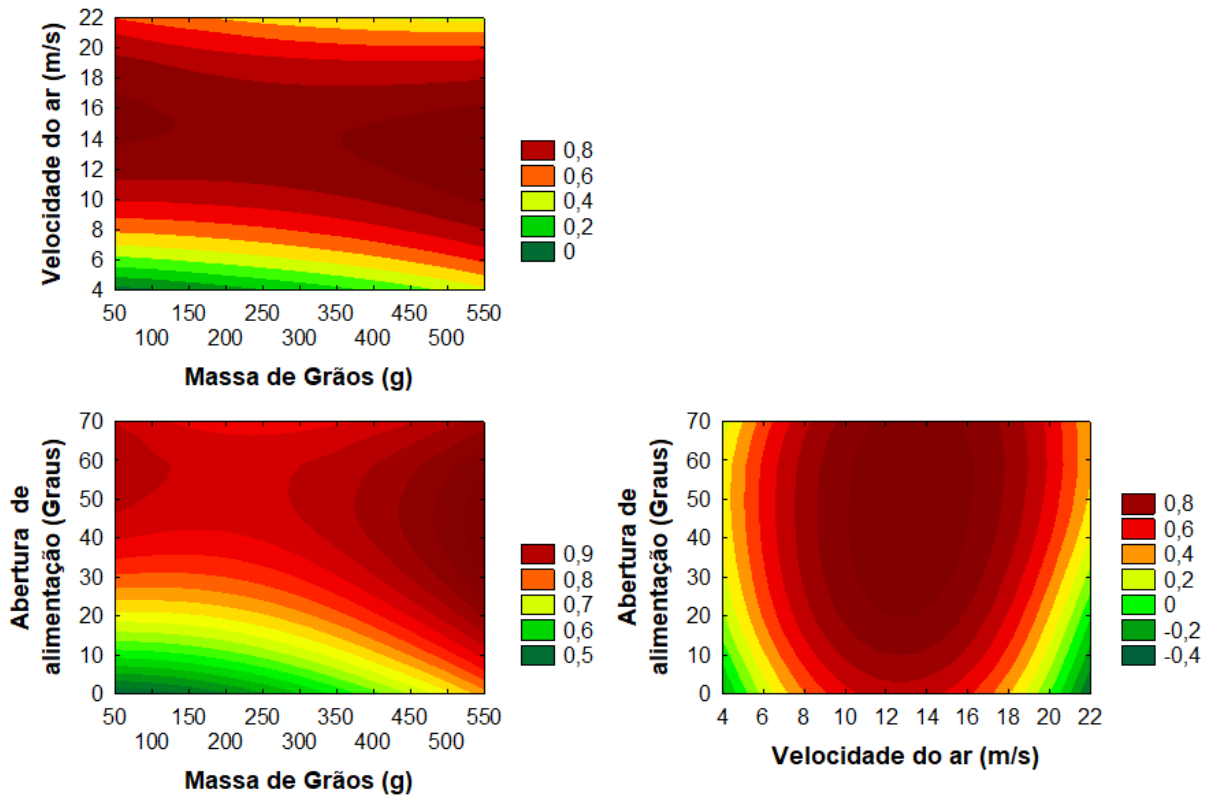


Figura A1: Superfícies de contorno ajustadas para a função Desejabilidade Global, com base na interação entre as variáveis percentual de impureza, percentual de perda e percentual de acúmulo, obtidas a partir dos testes com o protótipo em escala piloto.