

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PROJETO DE EXPERIMENTO AO PROCESSO DE
EXTRUSÃO TERMOPLÁSTICA DE FARINHA DE MILHO

por

Renan Gomes da Silva Amaral

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2014.

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PROJETO DE EXPERIMENTO AO PROCESSO DE
EXTRUSÃO TERMOPLÁSTICA DE FARINHA DE MILHO

por

Renan Gomes da Silva Amaral

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof.^a Dr.^a Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Ligia Damasceno Ferreira Marczak

Prof. Horácio Antonio Vielmo

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 27, novembro de 2014.

À minha família, por tornarem possíveis os meus sonhos
Ao meu pai e mentor Renato Amaral
À minha mãe e conselheira Maria Cristina Gomes da Silva
À minha esposa e companheira Camila Wrasse da Rosa
À minha filha e motivação Marina Wrasse Amaral

AMARAL, R. G. S. **Aplicação do método de projeto de experimento ao processo de extrusão termoplástica de farinha de milho.** 2014. 18 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

O método de projeto de experimento de análise fatorial 2^k é aplicado para analisar o processo de extrusão termoplástica de farinha de milho visando quantificar a influência de parâmetros de controle operacionais sobre as características do produto final. Os parâmetros de controle avaliados são a temperatura do canhão de extrusão, a rotação do fuso e o teor de umidade estipulado na formulação dos ingredientes. Os parâmetros de resposta avaliados são o índice de expansão e força de quebra do produto. Mostram-se individualmente influentes sobre o índice de expansão a temperatura do canhão, a velocidade de rotação do fuso e o teor de umidade da formulação. As interações entre velocidade de rotação do fuso e teor de umidade e entre temperatura e teor de umidade não apresentaram influência sobre o índice de expansão. Não houve influência da velocidade de rotação do fuso e teor de umidade da formulação sobre a força de quebra do produto, nem individualmente e nem da interação entre esses parâmetros. Todas as outras interações e individualmente a temperatura do canhão de extrusão apresentaram influência sobre a força de quebra do produto. O resultado é dado por meio de equações para as superfícies de resposta em função dos parâmetros de controle.

PALAVRAS-CHAVE: Extrusão. Análise Fatorial. Parâmetros.

AMARAL, R. G. S. **Design of experiment method application to the thermoplastic extrusion process of cornmeal.** 2014. 18 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ABSTRACT

The method of design experiment 2^k factorial analysis is used to analyze the process of thermoplastic extrusion of cornmeal in order to quantify the influence of operational control parameters over the characteristics of final product. The control parameters evaluated are the temperature of the extrusion barrel, the speed rotation of screw and the prescribed moisture content of the ingredients formulation. Response parameters evaluated are the rate of expansion and breaking strength of the product. Showed individually influence on the expansion ratio the cylinder temperature, the rotation speed of screw and the moisture content of the formulation. The interactions between the rotation speed and moisture content and between the temperature and moisture content had no influence on the rate of expansion. There was no influence of the screw speed rotation and moisture content of the formulation on the breaking strength of the product, nor individual, nor the interaction between these parameters. All other interactions and individual temperature extrusion barrel had influence on the breaking strength of the product. The result is given by the equation for the response surface as a function of the control parameters.

KEYWORDS: Extrusion. Factorial Analysis. Parameters.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3. OBJETIVOS	2
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
4.1. Projeto de Experimento	2
4.1.1. Análise Fatorial de Experimentos	3
4.2. Extrusão Termoplástica de Alimentos.....	5
4.2.1. Parâmetros de Controle.....	6
4.2.2. Parâmetros de Qualidade.....	7
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	7
5.1. Equipamento de Extrusão	7
5.2. Instrumentação.....	8
6. RESULTADOS	9
6.1. Análise Fatorial dos Resultados	9
6.2. Interpretação de Resultados.....	11
6.2.1. Influência da Temperatura do Canhão de Extrusão – Parâmetro A	11
6.2.2. Influência da Velocidade de Rotação do Fuso Extrusor – Parâmetro B.....	12
6.2.3. Influência do Teor de Umidade da Formulação – Parâmetro C	12
7. CONCLUSÕES	12
7.1. Análise Fatorial 2 ³	Erro! Indicador não definido.
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
APÊNDICE I – Resultados descritivos do método	14
ANEXO I – Tabela de Distribuição F	18

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
(1)	Soma dos resultados das repetições do teste (1).	*
<i>a</i>	Soma dos resultados das repetições do teste <i>a</i> .	*
<i>b</i>	Soma dos resultados das repetições do teste <i>b</i> .	*
<i>c</i>	Soma dos resultados das repetições do teste <i>c</i> .	*
<i>ab</i>	Soma dos resultados das repetições do teste <i>ab</i> .	*
<i>ac</i>	Soma dos resultados das repetições do teste <i>ac</i> .	*
<i>bc</i>	Soma dos resultados das repetições do teste <i>bc</i> .	*
<i>abc</i>	Soma dos resultados das repetições do teste <i>abc</i> .	*
<i>Contraste_i</i>	Diferença entre a soma dos resultados para os níveis superiores e inferiores do teste <i>i</i> .	*
<i>l</i>	Efeito médio do parâmetro, ou interação entre parâmetros, <i>l</i> .	*
<i>n</i>	Número de repetições em cada teste.	Repetições
<i>SS_i</i>	Soma dos quadrados dos contrastes do teste <i>i</i> .	*
<i>i</i>	Notação simbólica para identificação de teste. <i>i</i> = <i>a, b, c, ab, ac, bc e abc</i>	-
<i>SS_T</i>	Soma dos quadrados dos efeitos totais do experimento.	*
<i>SS_E</i>	Soma dos quadrados do erro de cálculo.	*
<i>MS_E</i>	Quadrado significativo do erro de cálculo.	*
<i>MS_i</i>	Quadrado significativo do teste <i>i</i> .	*
<i>F_{Oi}</i>	Valor final do teste <i>i</i> para o teste de hipótese.	-
<i>F_{α, n-1, N-1}</i>	Valor de referência para o teste de hipótese.	-
<i>N</i>	Número total de amostras do experimento.	Amostras
<i>α</i>	Valor de significância para o teste de hipótese.	-
<i>β_i</i>	Constantes do modelo de regressão.	*
<i>X_i</i>	Variável codificada do modelo de regressão.	-
<i>X̂_I</i>	Variável medida do parâmetro de controle para inserção no modelo de regressão.	*
<i>Superior_i</i>	Valor do nível superior do parâmetro de controle <i>i</i> .	*
<i>Inferior_i</i>	Valor do nível Inferior do parâmetro de controle <i>i</i> .	*
<i>R_{Expansão}</i>	Razão de expansão do produto extrusado expandido.	-
<i>D_{Produto}</i>	Diâmetro final do produto extrusado expandido.	mm
<i>D_{Matriz}</i>	Diâmetro da abertura da matriz do equipamento.	mm

* = Unidade depende do parâmetro utilizado

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de extrusão termoplástica vem sendo amplamente utilizada na indústria alimentícia, por permitir a obtenção de alimentos com diferentes características funcionais, sensoriais e nutricionais [Guerreiro, 2007]. Sua utilização com diferentes variedades de alimentos resulta em uma gama de produtos de alto valor agregado, com custo de investimento e operação relativamente baixos. Embora a extrusão seja um processo tecnologicamente simples, ela depende de vários fatores que impõem desafios para seu controle. Logo, o profissional que almeja atuar na área deve conhecer e quantificar a influência dos parâmetros de controle do processo de extrusão termoplástica de alimentos.

Frente a esse desafio, os métodos de análise referenciados sob o nome de Projeto de Experimentos [Montgomery, 2012] oferecem ferramentas importantes para especular o comportamento das características do produto final, e em particular destaca-se a análise fatorial 2^k , um método ótimo para a realização de abordagens iniciais sobre processos. Ele exige uma amostragem pequena e restringe os parâmetros a dois níveis, gerando uma superfície de resposta aproximadamente plana que fornece uma primeira noção do comportamento do processo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A extrusão termoplástica de alimentos é um processo de fabricação versátil. Um único equipamento extrusor pode fabricar produtos de diferentes tamanhos, formatos e aplicações. Graças a sua versatilidade, esse processo está difundido no mercado em diferentes áreas e com diferentes objetivos. Consequentemente, existem estudos sobre a extrusão de alimentos com as mais variadas propostas.

Capriles e Arêas, 2012, avaliaram a qualidade de *snacks* obtidos por extrusão de grão integral de amaranto ou de farinha de amaranto desengordurada e suas misturas com fubá de milho. O experimento definiu como parâmetros fixos de processo teor de umidade da mistura de 15%, rotação do fuso em 404rpm, temperatura do canhão na zona de alta pressão de 90°C e matriz contendo três furos de 3,17mm. Ao final dos testes foram avaliados: razão de expansão, massa específica, volume específico, força de quebra, tensão de cisalhamento, atividade da água e teor de umidade final das amostras. Os autores utilizaram os métodos de projeto de experimento ANOVA e pós-teste de *Turkey*, ambos com nível de significância 5%. Concluiu-se, nas condições do experimento, que não foi possível obter *snacks* extrusados a base de grãos e amaranto de boa aceitação e que a produção de *snacks* extrusados a base de farinha de amaranto desengordurada proporciona produtos com melhor aceitação por parte do consumidor.

Lustosa et al., 2009, avaliaram os efeitos das condições operacionais de processo de extrusão (temperatura de extrusão, umidade e teor de proteína) na obtenção de produtos expandidos de mandioca, enriquecidos com caseína, visando fornecer informações ao setor de processamento de mandioca. A avaliação definiu como parâmetros fixos a taxa de compressão da rosca (4,5mm de profundidade e 14mm de largura), a taxa de alimentação de 150g/min, a abertura da matriz de 3mm, as temperaturas na primeira zona de 25°C e segunda zona de 60°C, rotação do fuso em 272rpm. As respostas mensuradas no experimento foram o índice de expansão, o volume específico, a cor e a dureza. O parâmetro dureza foi avaliado usando um texturômetro TA-XT2 de carga máxima 5kg usando como ferramenta WBV, lâmina com abertura em V. Os parâmetros usados na avaliação de dureza foram velocidade de pré-teste de 4mm/s, velocidade de teste de 1mm/s e pós-teste de 5mm/s. A ferramenta de análise foi a ANOVA, com nível de significância de 5%, que mostrou que as condições de menor umidade, teor de proteína e temperatura proporcionaram a obtenção de produtos expandidos com atributos desejados, ou seja, cor mais clara, alta expansão e baixa dureza.

Carvalho et al., 2003, propuseram a elaboração de *snacks* de arroz formulados com açúcar por extrusão. O experimento foi realizado mantendo temperatura na última zona do

extrusora entre 160°C e 170°C, teor de umidade da mistura inferior a 14% e matriz com abertura circular de 3mm. O experimento variou as quantidades de açúcar na mistura entre 10% a 20% da massa de farinha utilizada. Embora a adição de açúcar à mistura provoque redução na expansão do produto final, o experimento provou que o manejo adequado dos outros parâmetros de controle pode permitir a obtenção de resultados satisfatórios.

Kim et al., 2008, propuseram o desenvolvimento de *snacks* de farinha de trigo, milho e arroz com incorporação de isolado proteico de soja. O experimento definiu fixos a velocidade de alimentação de 110g/min, velocidade de rotação do fuso de 150rpm, diâmetro da abertura da matriz de 2,9mm e teor de umidade da mistura de 16%. As amostras foram produzidas variando a fração em massa de isolado proteico e a temperatura na zona de extrusão. Os parâmetros de resposta avaliados foram índice de expansão, dureza, luminosidade, índice de absorção de água, índice de solubilidade em água e resposta de análise sensorial. O planejamento fatorial completo 2^2 incluiu três repetições no ponto central e quatro pontos axiais, totalizando onze ensaios. Os autores concluíram que é possível obter produtos expandidos por extrusão contendo alto teor de proteínas pela adição de isolado proteico de soja.

Os estudos realizados em extrusão termoplástica de alimentos comumente visam mensurar as variações das características no produto final frente a modificações na formulação da mistura dos ingredientes. Estudos focados no equipamento utilizado e em seus parâmetros de controle são pouco comuns na literatura, embora sua influência no produto final seja tão importante quanto as alterações na sua formulação.

Os experimentos citados mostram semelhança nos valores de utilização do equipamento. O teor de umidade da mistura na alimentação ficou em torno de 14% a 22%, a rotação do fuso extrusor entre 150rpm a 400rpm, a temperatura na zona de extrusão entre 65°C a 170°C e a abertura da matriz de 3mm. A significância da análise de variância do experimento é de 5%.

3. OBJETIVOS

O presente estudo visa quantificar através de análise fatorial a influência das variações de parâmetros de controle como temperatura do canhão de extrusão, fração mássica de água na mistura de ingredientes e velocidade de rotação do fuso extrusor sobre as características finais do salgadinho de milho obtido por extrusão termoplástica.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. Projeto de Experimento

Segundo Montgomery, 2012, existem diversos tipos de experimentos capazes de estudar o efeito de um ou mais parâmetros de controle sobre um parâmetro de resposta, mas o autor salienta que a análise fatorial seja mais eficiente nesse caso. A eficiência dos métodos de análise fatorial se dá graças a sua capacidade de avaliar o efeito de todas as combinações possíveis entre os níveis de parâmetros de controle especificados de forma tão precisa quanto outros métodos, porém utilizando um número inferior de amostras.

Dentre os métodos de prospecção destaca-se a análise fatorial 2^k , que é particularmente útil nas etapas iniciais do trabalho experimental. O método é capaz de produzir um estudo de análise fatorial completo, utilizando o menor número possível de amostras se comparado aos demais.

Como o método utiliza apenas dois níveis na variação de cada parâmetro, assume que a resposta sendo aproximadamente linear dentro do intervalo desses níveis. O estudo inicial do processo pode ser conduzido por meio de experimentos de rastreamento, e o método permite avaliar a qualidade das suposições assumidas nessa etapa.

4.1.1. Análise Fatorial de Experimentos

Esse método será particularizado a seguir para três parâmetros de controle por se tratar da aplicação desenvolvida no presente trabalho. A análise fatorial 2^3 fornece oito resultados oriundos da combinação entre os três parâmetros de controle em dois níveis, o superior e o inferior. O método visa à obtenção de uma região de previsão de resposta dada em um espaço cartesiano, como mostra a Figura 4.1.

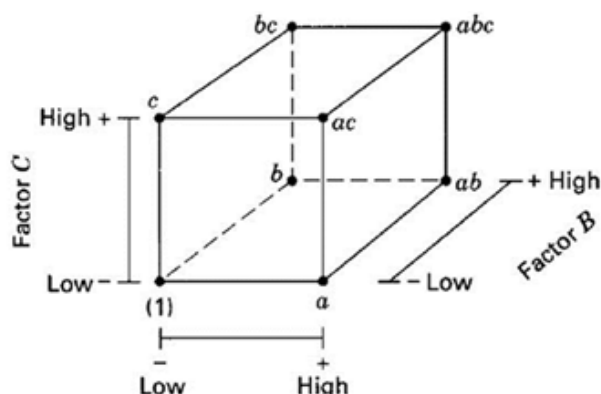


Figura 4.1 - Representação geométrica da análise fatorial 2^k para 3 parâmetros de controle.

[Montgomery, 2012]

Cada eixo corresponde a um parâmetro de controle e cada vértice traz um dos oito testes realizados. A Tabela 4.1 mostra a combinação dos parâmetros de controle que compõem os oito testes, e organiza as respostas para duas repetições e sua soma.

Tabela 4.1 – Parâmetros de controle do experimento e sua organização.

Identificação		Parâmetros de controle			Parâmetro de resposta		
Teste	Posição	A	B	C	Repetições		Soma
					1	2	
1	(1)	I	I	I	1	9	1 + 9
2	a	S	I	I	2	10	2 + 10
3	b	I	S	I	3	11	3 + 11
4	ab	S	S	I	4	12	4 + 12
5	c	I	I	S	5	13	5 + 13
6	ac	S	I	S	6	14	6 + 14
7	bc	I	S	S	7	15	7 + 15
8	abc	S	S	S	8	16	8 + 16

S = Nível Superior; I = Nível Inferior.

Chama-se de contraste o resultado do parâmetro de resposta dado pela diferença entre a soma dos resultados para os níveis superiores e inferiores, sempre obtida a partir da variação dos parâmetros de entrada, quer seja individualmente quer seja de suas interações, apresentado nas equações (4.1).

$$\text{Contraste}_A = [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc] \quad (4.1.a)$$

$$\text{Contraste}_B = [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac] \quad (4.1.b)$$

$$\text{Contraste}_C = [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab] \quad (4.1.c)$$

$$\text{Contraste}_{AB} = [abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)] \quad (4.1.d)$$

$$\text{Contraste}_{AC} = [abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)] \quad (4.1.e)$$

$$\begin{aligned} \text{Contraste}_{BC} &= [(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc] & (4.1.f) \\ \text{Contraste}_{ABC} &= [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)] & (4.1.g) \end{aligned}$$

onde (1) e as letras representam os resultados obtidos pela aplicação das combinações dos parâmetros de controle.

Pode-se então obter a média dos efeitos causados no parâmetro de resposta devido a cada um dos iésimos parâmetros de controle I , dado por:

$$I = \frac{1}{4n} \text{Contraste}_i \quad (4.2)$$

onde n corresponde ao número de repetições de cada teste, que no caso mostrado na tabela corresponde a 2.

Avalia-se a soma dos quadrados SS_i dos efeitos causados por cada parâmetro de controle e suas interações sobre o parâmetro de resposta.

$$SS_i = \frac{1}{8n} \text{Contraste}_i^2 \quad (4.3)$$

A avaliação do erro depende da soma total dos quadrados dos efeitos SS_T , dado por:

$$SS_T = \sum (\text{Resultado de cada amostra})^2 - \frac{(\sum \text{Resultado de cada amostra})^2}{\text{Número total de amostras}} \quad (4.4)$$

onde o resultado de cada amostra é o valor medido do parâmetro de resposta individualmente em cada repetição de cada um dos oito testes realizados.

O erro causado pelo procedimento de cálculo do método é avaliado pela diferença SS_E entre a soma total dos quadrados dos efeitos de todas as somas dos quadrados para cada parâmetro de controle, como segue.

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} - SS_{ABC} \quad (4.5)$$

Com esses dados chega-se nos quadrados significativos do experimento, obtidos da forma:

$$MS_i = \frac{SS_i}{(n-1)} \quad (4.6)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{2^3} \quad (4.7)$$

onde MS_i é o quadrado significativo da influência do parâmetro de controle I e MS_E é o quadrado significativo do erro de cálculo.

Por fim, chega-se à verificação da hipótese de significância dos parâmetros de controle e suas interações sobre o parâmetro de resposta estudado. O teste funciona da seguinte maneira: os valores de quadrados significativos de cada parâmetro de controle ou interação, Equação (4.6), são divididos pelo quadrado significativo do erro de cálculo, obtendo-se então um valor F_o , que será comparado a outro valor F de referência, obtido da Figura A1 do Anexo I, que depende do nível de significância do experimento e da quantidade de testes e amostras. O valor de F_o referente ao parâmetro i que se procura é:

$$F_{O_i} = \frac{MS_i}{MS_E} \quad (4.8)$$

A razão entre F_o e F obtida serve para analisar o experimento. Se a razão for superior à unidade, o parâmetro de controle é influente sobre o parâmetro de resposta. Vale ressaltar que o autor ainda considera valores próximos a unidade como sendo sutilmente influentes sobre o parâmetro de saída, devendo então ser considerados na próxima etapa. A comparação fica da forma:

$$F_{O_i} > F_{\alpha, n-1, N-n} \quad (4.9)$$

onde α é a significância do experimento, n o número de amostras para cada teste e N o número total de amostras do experimento.

Finalmente, pode-se usar um modelo de regressão e gerar uma função geradora da região cúbica de previsão de resposta ilustrada na Figura 4.1.

O modelo de regressão para o parâmetro de saída \hat{Y} será na forma:

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \hat{\beta}_3 X_3 + \hat{\beta}_{12} X_1 * X_2 + \hat{\beta}_{13} X_1 X_3 + \hat{\beta}_{23} X_2 X_3 + \hat{\beta}_{123} X_1 X_2 X_3 \quad (4.10)$$

onde os β 's refere-se aos efeitos médios de cada parâmetro de controle, e cada X representa uma variável codificada referente ao valor do parâmetro de, como segue

$$\hat{\beta}_0 = 1 \quad (4.11)$$

$$\hat{\beta}_i = \frac{I}{2} \quad (4.12)$$

$$X_i = \frac{\hat{X}_i - \frac{(Superior_i + Inferior_i)}{2}}{\frac{(Superior_i - Inferior_i)}{2}} \quad (4.13)$$

onde I é o efeito médio causado pelo parâmetro de controle, Equação (4.2), \hat{X}_i a nova variável referente diretamente ao parâmetro de controle de interesse, $Superior_i$ é o valor do nível superior do parâmetro de controle e $Inferior_i$ é o valor do nível inferior do parâmetro de controle.

4.2. Extrusão Termoplástica de Alimentos

A tecnologia de extrusão termoplástica é um processo de tratamento termomecânico que modifica profundamente a matéria prima, dando-lhe novas formas, estruturas e características funcionais e nutricionais. O princípio do processo de extrusão é converter o material sólido em uma massa fluida dentro do equipamento, pela aplicação de calor e trabalho mecânico, e extrusá-lo através de uma matriz, promovendo assim sua termoplastificação (Figura 4.2).

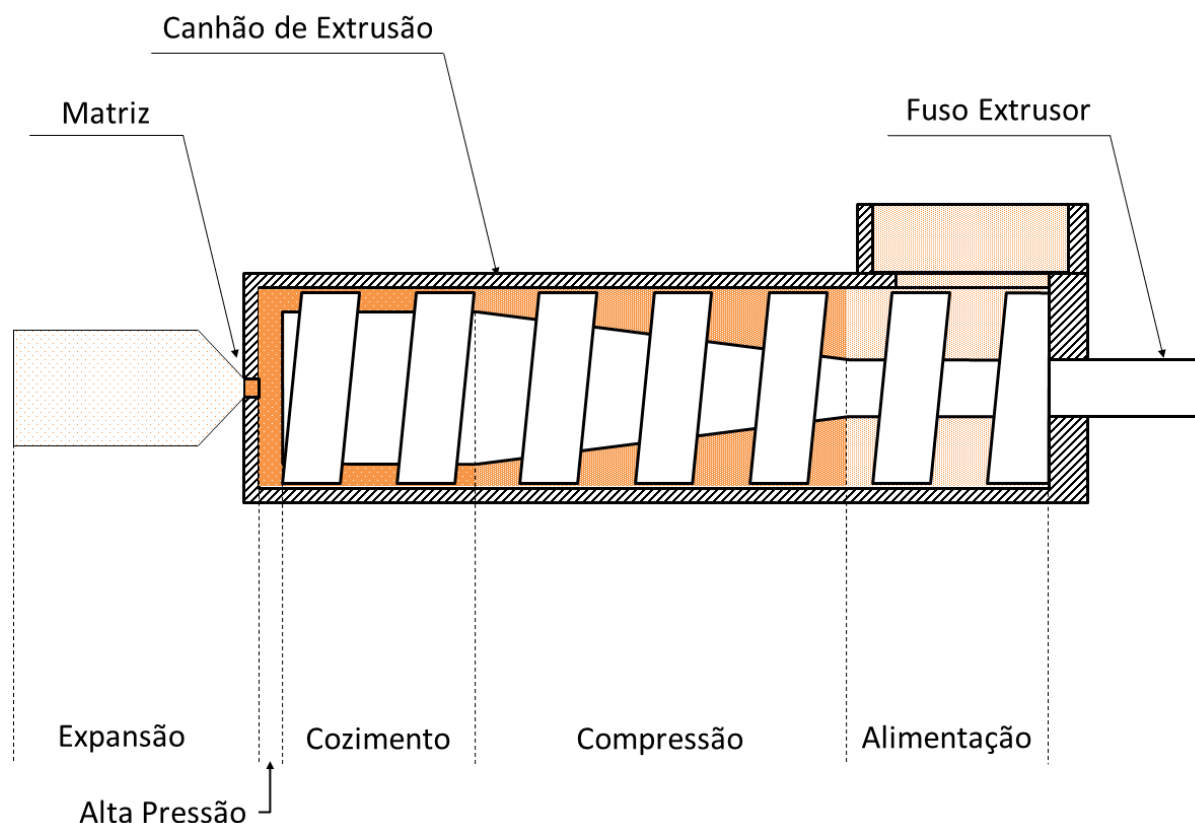


Figura 4.2 – Extrusão de alimentos expandidos.

O alimento é admitido na área de alimentação e o fuso, ao girar, conduz o material pelas fases de compressão, cozimento e expansão. Seu transporte se encerra na matriz, onde o material, agora uma massa uniforme, é lançado ao ambiente externo. Um extrusor desempenha o papel de reator químico de processamento de alimentos em condições de altas temperaturas, até 250°C, altas pressões, até 25MPa, e em curto tempo de residência, entre um e dois minutos [Guerreiro, 2007].

A produção de alimentos expandidos por extrusão depende da temperatura, teor de umidade e pressão impostas ao alimento durante o processamento. A expansão do produto ocorre quando o alimento é submetido a temperaturas superiores ao seu ponto de ebulição e pressões superiores a ambiente, desde que mantenha a água da formulação em sua fase líquida. Quando o alimento é expelido da máquina ocorre a evaporação quase instantânea de uma fração de água existente no alimento.

4.2.1. Parâmetros de Controle

Os principais fatores influentes na alteração das características finais de um produto expandido por extrusão podem ser divididos em três grupos: parâmetros construtivos do equipamento, parâmetros referentes à formulação e parâmetros referentes ao controle do equipamento.

Parâmetros construtivos são aqueles que não podem ser variados durante a operação, como a matriz de extrusão. A restrição da passagem do produto pelo orifício da matriz influi na pressão interna ao canhão de extrusão. A configuração do fuso de extrusão define a existência e a intensidade da compressão do produto contra as paredes do canhão de extrusão, o tempo de residência do produto no equipamento e conseqüentemente a produção do equipamento. Havendo crescimento do diâmetro interno da rosca do fuso há aumento de pressão no canhão de extrusão, aumento do cisalhamento das partículas do produto e conseqüentemente uma elevação da temperatura dentro do equipamento. Também a inclinação da hélice do fuso

determina o deslocamento da massa de produto dentro do equipamento, havendo controle de temperatura e definindo-se o tempo de cozimento do material. As dimensões do filete e passo da rosca definem o tamanho da produção do equipamento.

Parâmetros referentes à formulação são características da mistura de ingredientes que são alteradas em etapas anteriores ao processo de extrusão. O teor de umidade inicial da mistura é determinante para a gelatinização do amido e da expansão do produto ao final do processo. A expansão do produto na saída do equipamento ocorre devido à evaporação da água misturada à massa de produto. A gelatinização do amido, principal componente energético dos cereais, ocorre quando há uma fração mínima de cerca de 30% de água na mistura e essa é submetida a temperaturas entre 50°C e 80°C [Guerreiro, 2007]. Esse fenômeno altera as propriedades físicas e químicas do alimento, concedendo maior digestibilidade ao produto. Outras variações na formulação como alteração do teor de gordura, teor proteico ou a utilização de aditivos e emulsificantes podem modificar significativamente o resultado do processo e por isso são especificados individualmente para cada tipo de produto final, se necessário.

Parâmetros referentes ao controle do processo são aqueles que podem ser alterados durante a operação de extrusão. A velocidade de rotação do fuso usualmente controlada pela frequência do motor de acionamento, pode ser utilizada para variações na pressão e temperatura interna ao equipamento, o tempo de residência do produto dentro do equipamento e a produção final do processo. O aumento na velocidade de rotação do fuso aumenta a vazão de massa passante pelo equipamento. Como a matriz do equipamento não é alterada, as pressões internas ao canhão se elevam graças à restrição do fluxo na saída do equipamento. O aumento na rotação pode também elevar a temperatura interna do equipamento pelo aumento de fricção entre as peças e o produto e do produto contra si mesmo. O controle de temperatura do processo pode ser feito pelo aquecimento ou resfriamento do canhão de extrusão. O controle pode ser feito através de medidores fixos ao lado externo do canhão com acionamento automático do aquecedor ou resfriador.

4.2.2. Parâmetros de Qualidade

O controle do processo de extrusão permite a obtenção de produtos com características variadas, melhorando a eficiência e economia da operação. As formas mais usuais de avaliação encontradas na literatura são a razão de expansão $R_{Expansão}$ e força de quebra.

A proporção na qual o produto teve sua seção transversal aumentada é avaliada pelo razão de expansão, que pode ser calculado pela relação entre o diâmetro do produto extrusado e o diâmetro do orifício da matriz [Guerreiro, 2007].

$$R_{Expansão} = \frac{D_{Produto}}{D_{Matriz}} \quad (4.14)$$

A sensação de dureza do alimento é avaliada pela força necessária para romper as estruturas do produto. Essa força de quebra é avaliada através de equipamentos específicos, como texturômetros, que são equipamentos que medem as deflexões em seu braço de medição causadas pela resistência à ruptura do alimento, mantendo-se constante o deslocamento.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Equipamento de Extrusão

O processamento das amostras foi realizado em uma extrusora laboratorial de pequenas dimensões. A máquina é composta por um conjunto estrutural onde são fixos o motor elétrico, uma transmissão mecânica de redução, um canhão de extrusão, um fuso extrusor, um

cabeçote de fixação da matriz, a matriz de formatação, um conjunto de resistências elétricas, um quadro de comando e demais componentes mecânicos como polias, correia, acoplamento e mancal de rolamento.

O acionamento do equipamento é realizado por um motor elétrico *WEG Plus* de 4 polos, 5HP e rotação 1600 rpm. O controle da rotação do equipamento é realizado por meio de um inversor de frequência.

A transmissão de potência do motor de acionamento para o equipamento é feita por uma redução mecânica que reduz a velocidade de rotação em 7 vezes.

O fuso utilizado possui diâmetro externo de 39,75mm, passo da hélice de 45° e diâmetros internos diferentes em cada uma das cinco zonas de ação (Figura 5.1)

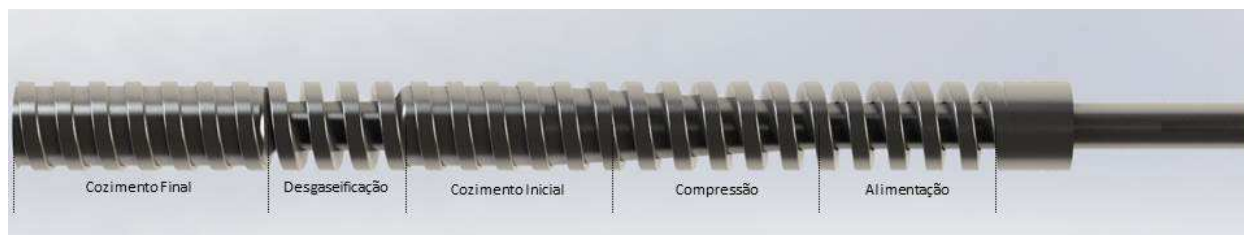


Figura 5.1 – Detalhamento do Fuso Extrusor

Na 1ª zona acontece a alimentação do equipamento, o diâmetro interno do fuso nessa zona é de 21mm, constante, onde é coletada a massa de ingredientes e empurrada para dentro do canhão extrusor. A 2ª zona de ação é responsável pela compressão da massa. A região possui um diâmetro variável que se inicia em 21mm e termina em 34,5mm apresentando uma angulação de 4,29°. Na 3ª zona ocorre o cozimento primário da massa de ingredientes, com diâmetro constante de 34,5. A 4ª zona de ação é responsável pela extração de gases indesejados da massa de ingredientes, com uma redução brusca de diâmetro interno para 27mm. A 5ª e última zona de ação é responsável pelo cozimento final da massa de ingredientes. Também chamada de zona de alta pressão ou de extrusão, possui diâmetro constante de 34,5mm. Ao final do canhão de extrusão é fixado o cabeçote de fixação da matriz. O cabeçote é responsável por impedir que o produto vaze do equipamento, mesmo sob altas pressões.

A matriz de formatação é responsável pelo formato final do produto, e aquela usada neste trabalho possui uma abertura de diâmetro 3mm, resultando em um salgadinho de milho cilíndrico. A matriz é uma placa de aço de espessura 6,35mm que suporta as altas pressões e temperaturas do final do processo.

O aquecimento do canhão de extrusão foi realizado por meio de quatro resistências elétricas de 500W fixadas na quinta zona de ação do canhão de extrusão.

5.2. Instrumentação

A Tabela 5.1 apresenta os instrumentos empregados para a medição dos parâmetros de controle e de resposta, juntamente com suas incertezas de medição.

Tabela 5.1 – Instrumentação empregada na medição dos parâmetros da extrusora.

Ferramenta de Medição	Incerteza de Medição
Balança de Precisão Marte AC10K	0,1g (Valor Lido)
Tacômetro Digital Impac DT6234B	0,05% + 1 Dígito do Visor
Paquímetro Analógico Mitutoyo	0,05mm
Texturômetro <i>TA.XT Plus Texture Analyzer</i>	0,5% do Valor de Força Medido.
Controlador de Temperatura <i>Novus N2000</i>	0,2% do Valor de Temperatura Medido

6. RESULTADOS

6.1. Análise Fatorial dos Resultados

Os níveis de cada parâmetro de controle são apresentados na Tabela 6.1. As amostras analisadas foram aquelas que atingiram índices de expansão e força de quebra adequados em respeito à qualidade do produto.

Tabela 6.1 – Organização dos ensaios do experimento seguindo a nomenclatura da Figura 4.1

Posição	Parâmetro A: Temperatura [°C]	Parâmetro B: Rotação [rpm]	Parâmetro C: Teor de Umidade [%]
(1)	120	115	30
a	160	115	30
b	120	174	30
ab	160	174	30
c	120	115	50
ac	160	115	50
bc	120	174	50
abc	160	174	50
	Temperatura da zona de cozimento do canhão de extrusão.	Velocidade de Rotação do Fuso Extrusor	Teor de umidade da massa de ingredientes na entrada do equipamento.

As próximas tabelas apresentam os resultados da aplicação do método de análise fatorial. As Tabelas 6.2 e 6.3 apresentam os parâmetros de resposta e as Tabelas 6.4 e 6.5 relatam os passos previstos pelo método, discutidos na Fundamentação Teórica.

Tabela 6.2 – Resultados dos ensaios para o índice de expansão.

Resultados de Medição do Índice de Expansão [-]						
Posição	Repetições					Soma
	1	2	3	4	5	
(1)	2,23	2,03	1,83	2,13	2,07	10,29
a	2,39	2,15	2,55	2,12	2,06	11,28
b	2,41	2,22	2,59	2,16	2,52	11,89
c	1,36	1,23	1,44	1,21	1,29	6,54
ab	2,57	2,30	2,48	2,56	2,41	12,32
ac	2,13	2,16	2,05	2,17	2,24	10,75
bc	1,98	1,91	2,17	2,06	2,42	10,54
abc	1,74	1,85	1,97	2,01	1,87	9,45

Tabela 6.3 – Resultados dos ensaios para força de quebra.

Resultados de Medição da Força de Quebra [N]						
Posição	Repetições					Soma
	1	2	3	4	5	
(1)	6,463	6,243	7,302	12,258	15,268	47,53
a	15,946	16,283	6,61	27,382	19,997	86,22
b	10,921	18,58	12,326	6,399	3,918	52,14
c	17,966	20,197	69,341	51,198	51,103	209,81
ab	21,784	15,558	21,294	15,957	13,676	88,27
ac	17,112	36,585	31,434	14,813	8,913	108,86
bc	16,54	13,468	6,186	5,937	25,936	68,07
abc	3,747	15,91	16,739	10,696	7,713	54,81

Tabela 6.4 – Análise fatorial dos resultados de medição do índice de expansão.

Análise Fatorial – Índice de Expansão						
Parâmetro	Contraste	Efeito Médio	Soma dos Quadrados	Quadrados Significativos	Valor F	Teste de Hipótese
A	4,53	0,23	0,51	0,51	23,38	4,09
B	5,34	0,27	0,71	0,71	32,52	5,69
C	-8,52	-0,43	1,81	1,81	82,62	14,44
AB	-5,86	-0,29	0,86	0,86	39,07	6,83
AC	1,70	0,08	0,07	0,07	3,28	0,57
BC	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ABC	-4,74	-0,24	0,56	0,56	25,63	4,48
ERRO	-	-	0,70	0,02	1,00	-
TOTAL	-	-	5,234	-	-	-

Tabela 6.5 – Análise fatorial dos resultados de medição da força de quebra.

Análise Fatorial – Força de Quebra						
Parâmetro	Contraste	Efeito Médio	Soma dos Quadrados	Quadrados Significativos	Valor F	Teste de Hipótese
A	-139,35	-6,97	485,43	485,43	6,44	1,13
B	-89,19	-4,46	198,85	198,85	2,64	0,46
C	67,43	3,37	113,65	113,65	1,51	0,26
AB	185,07	9,25	856,28	856,28	11,36	1,99
AC	-288,96	-14,45	2087,49	2087,49	27,69	4,84
BC	-102,51	-5,13	262,69	262,69	3,48	0,61
ABC	190,19	9,51	904,30	904,30	11,99	2,10
ERRO	-	-	2412,55	75,39	1,00	-
TOTAL	-	-	7321,240	-	-	-

Os resultados qualitativos referentes à influência dos parâmetros oriundos da aplicação do método de análise fatorial 2³ são apresentados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Influência dos parâmetros de controle sobre os parâmetros de resposta.

Resultado Qualitativo de Análise Fatorial		
Parâmetro ou Interação	Índice de Expansão	Força de Quebra
A	Influente	Influente
B	Influente	Não Influente
C	Influente	Não Influente
AB	Influente	Influente
AC	Não Influente	Influente
BC	Não Influente	Não Influente
ABC	Influente	Influente

Os resultados quantitativos podem ser obtidos através dos modelos de regressão do método apresentados nas equações de (6.1) a (6.5), segundo o modelo discutido nas Equações (4.10) a (4.13).

$$IE \pm IM = 1 + [(0,11 \pm 0,16)X_1] - [(0,13 \pm 0,16) X_2] + [(0,21 \pm 0,16)X_3] + [(0,15 \pm 0,16)X_1X_2] - [(0,12 \pm 0,16)X_1X_2X_3] \quad (6.1)$$

$$FQ \pm IM = 1 + [(-3,48 \pm 0,04) * X_1] - [(4,63 \pm 0,04) * X_1 * X_2] + [(7,22 \pm 0,04) * X_1 * X_3] + [(4,75 \pm 0,04) * X_1 * X_2 * X_3] \quad (6.2)$$

$$X_1 = \left(\frac{(T_{[^\circ C]} \pm IM - 140 \pm 0,02)}{20 \pm 0,02} \right) \quad (6.3)$$

$$X_2 = \left(\frac{(n_{[rpm]} \pm IM - 144,5 \pm 0,05)}{29,5 \pm 0,05} \right) \quad (6.4)$$

$$X_3 = \left(\frac{(U_{[%]} \pm IM - 40 \pm 1,1)}{10 \pm 1,1} \right) \quad (6.5)$$

onde IE é o índice de expansão, adimensional, $T_{[^\circ C]}$ a variável referente temperatura do canhão de extrusão, em $^\circ C$, $n_{[rpm]}$ a variável referente a velocidade de rotação do fuso, em rpm, $U_{[%]}$ a variável referente ao teor de umidade da formulação inicial, em porcentagem de massa de água em relação a massa de farinha de milho.

O detalhamento preciso da aplicação do método é apresentado nas Tabelas A1, A2, A3 e A4 do Apêndice I.

6.2. Interpretação dos Resultados

A influência dos parâmetros de controle foi quantificada pelo efeito médio determinado pelo método, Tabelas 6.4 e 6.5 – Coluna Efeito Médio. Denomina-se influência positiva o aumento do valor de resposta frente a uma elevação do valor de entrada, e influência negativa a queda do valor de resposta devido ao aumento do valor de entrada. A ordem de grandeza das influências dos parâmetros foi avaliada pelo teste de hipótese, Tabelas 6.4 e 6.5 – Coluna Teste de Hipótese. Quanto maior o valor obtido no teste, mais influente o parâmetro.

6.2.1. Influência da Temperatura do Canhão de Extrusão – Parâmetro A

A variação na temperatura do canhão de extrusão apresentou influência positiva sobre o índice de expansão (Tabelas 6.4 – Coluna Efeito Médio) e negativa sobre sua força de quebra

(Tabelas 6.5 – Coluna Efeito Médio). O comportamento deve-se à elevação da diferença de temperatura entre equipamento e produto, o que potencializa a transferência de calor. O aumento da energia no produto possibilita a mudança de fase de uma fração maior de água existente na mistura. Devido ao caráter instantâneo da troca de fase do líquido inserido na mistura a quantidade desse líquido define o vigor da expansão.

A formação da estrutura esponjosa do alimento se dá em função da intensidade da expansão. Quando a mudança de fase ocorre bruscamente o produto assume uma formação esponjosa de paredes finas, gerando um salgadinho maior e mais delicado. A atenuação da expansão resulta em paredes grossas e um salgadinho mais resistente e compacto.

6.2.2. Influência da Velocidade de Rotação do Fuso Extrusor – Parâmetro B

A variação na velocidade de rotação do fuso extrusor também apresentou influência positiva sobre o índice de expansão (Tabelas 6.4 – Coluna Efeito Médio), todavia não se apresentou influente sobre a força de quebra do produto (Tabelas 6.5 – Coluna Teste de Hipótese). A relevância desse parâmetro para o índice de expansão deve-se ao acréscimo da energia térmica e do trabalho exercido sobre o material. O aumento da velocidade de rotação do fuso provoca o crescimento da vazão no equipamento, e, devido à restrição da matriz, a elevação da pressão interna. Valores superiores de pressão propiciam um aumento de temperatura devido ao atrito entre as partículas do produto. Contudo, o acréscimo energético gerado pela elevação da velocidade de rotação do fuso não é superior à demanda causada pelo aumento da produção. A expansão expressiva devida ao aumento de pressão ao final do processo é compensada pela retração de um produto ainda úmido, fruto da deficiência energética. O aumento da velocidade de rotação no fuso embora permita uma expansão mais vigorosa ao fim do processo resulta em um salgadinho maior sem alterar sua resistência à ruptura.

6.2.3. Influência do Teor de Umidade da Formulação – Parâmetro C

O teor de umidade da formulação apresentou influência negativa sobre o índice de expansão, entretanto não se mostrou influente sobre a força de quebra do produto. A relevância do parâmetro para o índice de expansão deve-se à maior demanda energética ao final do processo. Visto que não houve alteração nos parâmetros que fornecem energia à mistura, o índice de expansão foi prejudicado pela retração do produto.

7. CONCLUSÕES

O método de projeto de experimento se mostrou eficaz na avaliação qualitativa da influência dos parâmetros de controle sobre as características finais do produto. Visto que o método assume relação linear entre os fatores e suas interações, as distâncias escolhidas entre os níveis de ensaio prejudicaram a precisão do modelo de regressão impedindo que esse possa ser utilizado na previsão matemática dos parâmetros de resposta. A obtenção de um modelo de regressão aceitável exige a aplicação de métodos de análise fatorial que abranjam muito mais níveis para cada parâmetro de controle avaliado. Resultando em uma discretização da curva de resposta altamente confiável.

As variações individuais dos três parâmetros de controle se apresentaram influentes no índice de expansão das amostras. Dentre as interações entre dois fatores, os ensaios que variaram os valores de teor de umidade combinado a outro parâmetro de controle não se mostraram influentes sobre a resposta avaliada. Todas as demais interações se mostraram influentes sobre o índice de expansão. Logo, ajustes no equipamento que visem melhorias no índice de expansão devem ser realizados alterando-se sutilmente a temperatura do canhão de extrusão ou a velocidade de rotação no fuso. Vale ressaltar que os excessos desses parâmetros combinados deterioraram a qualidade do produto.

Somente a variação individual da temperatura do canhão de extrusão se mostrou influente sobre a força necessária para a quebra do produto. Dentre as interações entre os parâmetros de controle, apresentaram influência apenas aquelas que foram combinadas à temperatura do canhão de extrusão. Conclui-se então que ajustes com o objetivo de reduzir a sensação de dureza do alimento devem ser realizados variando-se apenas a temperatura do canhão de extrusão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPRILES, V. D.; ARÊAS, J. A. G. **Quality assessment of snacks obtained by extrusion of whole amaranth grains or defatted amaranth flour and their mixtures with corn grits**. Brazilian Journal of Food Technology, v. 15, n. 1, p. 21–29, 2012. Acesso em: 20/10/2014.

CARVALHO, C. W. P. DE; ASCHERI, J. L. R.; NASCIMENTO, R. E.; CARVALHO, J. L. V. DE; DELLA MODESTA, R. C. **Elaboração de “Snacks” de arroz formulados com açúcar por extrusão**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia_de_alimentos/catalogo/REC000fdx2iqpp02wx5eo0a2ndxybln9xza.html>. Acesso em: 20/10/2014.

GUERREIRO, L. **Produtos Extrusados para Consumo Humano, Animal e Industrial**. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?cluster=16610105816287365837&hl=en&oi=scholar>>. Acesso em: 22/9/2014.

KIM, T.; SOUZA, A.; CHANG, Y. K. **Desenvolvimento de “snacks” de farinhas de trigo, milho e arroz com incorporação de isolado proteico de soja**. , 2008.

LUSTOSA, B. H. B.; LEONEL, M.; MISCHAN, M. M. **Influência de parâmetros de extrusão na absorção e solubilidade em água de farinhas pré-cozidas de mandioca e caseína**. Alimentos e Nutrição Araraquara, v. 20, n. 2, p. 223–229, 2009. Acesso em: 20/10/2014.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8 edition ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2012.

APÊNDICE I – RESULTADOS DESCRITIVOS DO MÉTODO

Tabela A1 – Resultado da avaliação do experimento segundo o índice de expansão.

IDENTIFICAÇÃO		CORPOS DE PROVA - ÍNDICE DE EXPANSÃO					
POSIÇÃO	ENSAIO	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	TOTAL
1	4	2,23	2,03	1,83	2,13	2,07	10,29
a	2	2,39	2,15	2,55	2,12	2,06	11,28
b	3	2,41	2,22	2,59	2,16	2,52	11,89
c	6	1,36	1,23	1,44	1,21	1,29	6,54
ab	1	2,57	2,30	2,48	2,56	2,41	12,32
ac	8	2,13	2,16	2,05	2,17	2,24	10,75
bc	5	1,98	1,91	2,17	2,06	2,42	10,54
abc	7	1,74	1,85	1,97	2,01	1,87	9,45

AVALIAÇÃO DE INFLUÊNCIAS							
FATOR	CONTRASTE	EFEITO MÉDIO	SOMA DOS QUADR.	QUAD. SIGNIF.	F	TESTE DE HIPÓTESE	EFEITO
A	4,53	0,23	0,51	0,51	23,38	4,09	Influente
B	5,34	0,27	0,71	0,71	32,52	5,69	Influente
C	-8,52	-0,43	1,81	1,81	82,62	14,44	Influente
AB	-5,86	-0,29	0,86	0,86	39,07	6,83	Influente
AC	1,70	0,08	0,07	0,07	3,28	0,57	Não Influente
BC	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Não Influente
ABC	-4,74	-0,24	0,56	0,56	25,63	4,48	Influente
ERRO	-	-	0,70	0,02	1,00	-	-
TOTAL	-	-	5,234	-	-	-	-

MODELO DE REGRESSÃO					
CONSTANTES DE REGRESSÃO			VARIÁVEIS CODIFICADAS		
β_0	1,00		T inferior	120	$X_a = \frac{T [^\circ\text{C}] - 140}{20}$
β_a	0,11		T superior	160	
β_b	0,13		n Superior	174	$X_b = \frac{n [\text{rpm}] - 144,5}{-29,5}$
β_c	-0,21		n Inferior	115	
β_{ab}	-0,15		U superior	50	$X_c = \frac{U [\%] - 40}{-10}$
β_{ac}	0,00		U inferior	30	
β_{bc}	0,00				
β_{abc}	-0,12				

INFORMAÇÕES AUXILIARES					
Níveis	2	Níveis por Parâmetro		5	Corpos de Prova por Ensaio
Teste de Hipótese F	5,72	$\alpha = 0,05$ (n-1) = 4 (N-1) = 39	Corpos de Prova	40	Corpos de Prova por Experimento

Tabela A2 – Cálculo de incertezas de medição do índice de expansão.

COLETA DE DADOS COM INCERTEZAS DE MEDIÇÃO												
Pos.	D1	SD1	D2	SD2	D3	SD3	D4	SD4	D5	SD5	T	ST
(1)	2,23	0,05	2,03	0,05	1,83	0,05	2,13	0,05	2,07	0,05	10,29	0,11
a	2,39	0,05	2,15	0,05	2,55	0,05	2,12	0,05	2,06	0,05	11,28	0,11
b	2,41	0,05	2,22	0,05	2,59	0,05	2,16	0,05	2,52	0,05	11,89	0,11
c	1,36	0,05	1,23	0,05	1,44	0,05	1,21	0,05	1,29	0,05	6,54	0,11
ab	2,57	0,05	2,30	0,05	2,48	0,05	2,56	0,05	2,41	0,05	12,32	0,11
ac	2,13	0,05	2,16	0,05	2,05	0,05	2,17	0,05	2,24	0,05	10,75	0,11
bc	1,98	0,05	1,91	0,05	2,17	0,05	2,06	0,05	2,42	0,05	10,54	0,11
abc	1,74	0,05	1,85	0,05	1,97	0,05	2,01	0,05	1,87	0,05	9,45	0,11

AVALIAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DO ERRO										
INF.	CONTRASTE		EFEITO		CONSTANTES		PARÂMETRO			VARIÁVEL CODIFICADA
	VALOR	IM	VALOR	IM	VALOR	IM	FATOR	VALOR	IM	
A	4,53	0,32	0,23	0,32	0,11	0,16	T inferior	120	0,02	X1 = $\frac{(T [^{\circ}C] \pm IM) - 140 \pm 0,02}{20 \pm 0,02}$
B	5,34	0,32	0,27	0,32	0,13	0,16	T superior	160	0,03	
C	-8,52	0,32	-0,43	0,32	-0,21	0,16	n Superior	174	0,09	X2 = $\frac{(n[rpm] \pm IM) - 144,5 \pm 0,05}{-29,5 \pm 0,05}$
AB	-5,86	0,32	-0,29	0,32	-0,15	0,16	n Inferior	115	0,06	
AC	1,70	0,32	0,08	0,32	0,00	0,16	U superior	50	1,10	X3 = $\frac{(U[\%] \pm IM) - 40 \pm 1,1}{-10 \pm 1,1}$
BC	0,06	0,32	0,00	0,32	0,00	0,16	U inferior	30	1,10	
ABC	-4,74	0,32	-0,24	0,32	-0,12	0,16				

Tabela A3 – Resultados da análise de força de quebra.

IDENTIFICAÇÃO		CORPOS DE PROVA - FORÇA DE QUEBRA					
POSIÇÃO	ENSAIO	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	TOTAL
1	4	6,463	6,243	7,302	12,258	15,268	47,53
a	2	15,946	16,283	6,61	27,382	19,997	86,22
b	3	10,921	18,58	12,326	6,399	3,918	52,14
c	6	17,966	20,197	69,341	51,198	51,103	209,81
ab	1	21,784	15,558	21,294	15,957	13,676	88,27
ac	8	17,112	36,585	31,434	14,813	8,913	108,86
bc	5	16,54	13,468	6,186	5,937	25,936	68,07
abc	7	3,747	15,91	16,739	10,696	7,713	54,81

AVALIAÇÃO DE INFLUÊNCIAS							
INFLU.	CONTR.	EFEITO MÉDIO	SOMA DOS QUAD.	QUAD. SIGNIFIC.	F	TESTE DE HIPÓTESE	EFEITO
A	-139,35	-6,97	485,43	485,43	6,44	1,13	Influente
B	-89,19	-4,46	198,85	198,85	2,64	0,46	Não Influente
C	67,43	3,37	113,65	113,65	1,51	0,26	Não Influente
AB	185,07	9,25	856,28	856,28	11,36	1,99	Influente
AC	-288,96	-14,45	2087,49	2087,49	27,69	4,84	Influente
BC	-102,51	-5,13	262,69	262,69	3,48	0,61	Não Influente
ABC	190,19	9,51	904,30	904,30	11,99	2,10	Influente
ERRO	-	-	2412,55	75,39	1,00	-	-
TOTAL	-	-	7321,240	-	-	-	-

MODELO DE REGRESSÃO							
CONSTANTES DE REGRESSÃO				VARIÁVEIS CODIFICADAS			
β_0			1,00				
β_a			-3,48	$T_{inferior}$	120	$X_a = \frac{T [^\circ C] - 140}{20}$	
β_b			0,00	$T_{superior}$	160		
β_c			0,00	$n_{superior}$	174	$X_b = \frac{n[rpm] - 144,5}{-29,5}$	
β_{ab}			4,63	$n_{inferior}$	115		
β_{ac}			-7,22	$U_{superior}$	50	$X_c = \frac{U[\%] - 40}{-10}$	
β_{bc}			0,00	$U_{inferior}$	30		
β_{abc}			4,75				

INFORMAÇÕES AUXILIARES				
Níveis	2	Níveis por Parâmetro	5	Corpos de Prova por Ensaio
Teste de Hipótese F	5,72	$\alpha = 0,05;$ $(n-1) = 4;$ $(N-1) = 39$	Corpos de Prova	40
				Corpos de Prova por Experimento

Tabela A4 – Cálculo de incertezas de medição da força de ruptura.

COLETA DE DADOS COM INCERTEZAS DE MEDIÇÃO												
Posição	D1	SD1	D2	SD2	D3	SD3	D4	SD4	D5	SD5	T	ST
(1)	6,463	0,0032	6,243	0,0031	7,302	0,0037	12,258	0,0061	15,268	0,0076	47,53	0,0114
a	15,946	0,0080	16,283	0,0081	6,61	0,0033	27,382	0,0137	19,997	0,0100	86,22	0,0207
b	10,921	0,0055	18,58	0,0093	12,326	0,0062	6,399	0,0032	3,918	0,0020	52,14	0,0130
c	17,966	0,0090	20,197	0,0101	69,341	0,0347	51,198	0,0256	51,103	0,0256	209,81	0,0519
ab	21,784	0,0109	15,558	0,0078	21,294	0,0106	15,957	0,0080	13,676	0,0068	88,27	0,0201
ac	17,112	0,0086	36,585	0,0183	31,434	0,0157	14,813	0,0074	8,913	0,0045	108,86	0,0270
bc	16,54	0,0083	13,468	0,0067	6,186	0,0031	5,937	0,0030	25,936	0,0130	68,07	0,0173
abc	3,747	0,0019	15,91	0,0080	16,739	0,0084	10,696	0,0053	7,713	0,0039	54,81	0,0134

AVALIAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DO ERRO										
INF.	CONTRASTE		EFEITO		CONSTANTES		PARÂMETRO			VARIÁVEL CODIFICADA
	VALOR	IM	VALOR	IM	VALOR	IM	FATOR	VALOR	IM	
A	-39,40	0,07	-4,93	0,07	-2,46	0,04	T inferior	120,00	0,02	X1 = $\frac{(T [^{\circ}C] \pm IM) - 140 \pm 0,02}{20 \pm 0,02}$
B	-189,13	0,07	-23,64	0,07	-11,82	0,04	T superior	160,00	0,03	X2 = $\frac{(n[rpm] \pm IM) - 144,5 \pm 0,05}{-29,5 \pm 0,05}$
C	167,37	0,07	20,92	0,07	10,46	0,04	n Superior	174,00	0,09	
AB	85,13	0,07	10,64	0,07	5,32	0,04	n Inferior	115,00	0,06	X3 = $\frac{(U[\%] \pm IM) - 40 \pm 1,1}{-10 \pm 1,1}$
AC	-189,02	0,07	-23,63	0,07	-11,81	0,04	U superior	50,00	1,10	
BC	-202,45	0,07	-25,31	0,07	-12,65	0,04	U inferior	30,00	1,10	
ABC	90,25	0,07	11,28	0,07	5,64	0,04				

IV. Percentage Points of the F Distribution (continued)

ν_2	Degrees of Freedom for the Numerator (ν_1)																			∞
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120		
2	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3	
3	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50	
4	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53	
5	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63	
6	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36	
7	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67	
8	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23	
9	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93	
10	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71	
11	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54	
12	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40	
13	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30	
14	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21	
15	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13	
16	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07	
17	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01	
18	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96	
19	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92	
20	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88	
21	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84	
22	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81	
23	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78	
24	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76	
25	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73	
26	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71	
27	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69	
28	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.45	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67	
29	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65	
30	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64	
40	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62	
60	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51	
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25	
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00	

Figura A1 – Tabela de obtenção de F para teste de hipótese com significância 0,05. (Montgomery, 2012)