

OSVALDO RESENDE

**VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS E DA
QUALIDADE DO FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.) DURANTE A SECAGEM E O
ARMAZENAMENTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2006

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

R433v
2006

Resende, Osvaldo, 1977-

Variação das propriedades físicas e mecânicas e da
qualidade do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) durante a
secagem e o armazenamento / Osvaldo Resende. – Viçosa
: UFV, 2006.

xv, 180f. : il. ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Paulo Cesar Corrêa.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 151-163.

1. Feijão - Armazenamento. 2. Feijão - Secagem.
3. *Phaseolus vulgaris* L. 4. Higroscopicidade. 5. Feijão -
Propriedades mecânicas. 6. Feijão - Doenças e pragas.
7. Feijão - Análise. 8. Feijão - Tecnologia pós-colheita.
9. Feijão - Composição. I. Universidade Federal de Viçosa.
II. Título.

CDD 22.ed. 635.65268

OSVALDO RESENDE

**VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS E DA
QUALIDADE DO FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.) DURANTE A SECAGEM E O
ARMAZENAMENTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 17 de fevereiro de 2006.

Prof. Paulo Roberto Cecon
(Conselheiro)

Prof. José Helvecio Martins

Prof. José Eustáquio de Souza Carneiro

Prof. Ednilton Tavares de Andrade

Prof. Paulo Cesar Corrêa
(Orientador)

Aos meus pais, José Resende e Calcina Nazaré Resende,

pelo amor, carinho, confiança, incentivo e dedicação irrestrita.

Aos meus irmãos, Leonardo e Rosária, exemplos

de caráter, bondade e união.

DEDICO

À minha amada esposa Renata, companheira irrestrita, pelo amor,

carinho, companheirismo, afeto, compreensão e cumplicidade

OFEREÇO

AGRADECIMENTO

A Deus, pelo dom da vida, saúde e presença constante em minha caminhada.

Ao Professor Paulo César Corrêa, pela orientação, amizade, confiança e participação relevante na execução deste trabalho, autor de valiosos ensinamentos e, ainda, pelo apoio constante nesta etapa importantíssima da minha formação.

À equipe de orientação, representada pelos professores Lêda Rita D'Antonino Faroni, Paulo Roberto Cecon e Maria Goreti de Almeida Oliveira, pelo auxílio e sugestões.

Aos professores Ednilton Tavares de Andrade, José Eustáquio de Souza Carneiro e José Helvecio Martins, pela participação na banca, sugestões e contribuições.

Ao Professor Tetuo Hara, pelos ensinamentos, amizade e sugestões.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pela amizade e pela ajuda na realização deste trabalho.

Aos amigos Deise, André, Ana Paula, Stelito e Acácio, colegas de caminhada, pelo companheirismo, amizade, apoio e incentivo.

Aos estudantes Fernando, Rodrigo e Rita, pelo auxílio na realização das diversas análises envolvidas.

Aos amigos Cassiano e Juliana, pelo apoio e amizade sincera.

À Universidade Federal de Viçosa e, em especial, ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do Curso.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

À minha esposa Renata, pelo amor, carinho, companheirismo, afeto, compreensão e cumplicidade, presentes em todos os momentos desta caminhada.

Aos meus pais e à minha família, pela união, humildade, simplicidade e apoio, sempre presentes na minha vida.

Aos amigos Silvestre, Mário e Henrique, pelo apoio de sempre.

Ao Francisco, Marco Aurélio e Sérgio, amigos de toda hora.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que este sonho se concretizasse.

BIOGRAFIA

OSVALDO RESENDE, filho de José Resende e Calcina Nazaré Resende, nasceu em Itumirim, Estado de Minas Gerais, em 9 de junho de 1977.

Em março de 1996, iniciou o Curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, MG, graduando-se em dezembro de 2000.

Em julho de 2001, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, no Departamento de Ciência dos Alimentos da UFLA, na área de Engenharia de Alimentos - Pós-Colheita de Produtos Agrícolas -, defendendo a dissertação em julho de 2003.

Em agosto de 2003, iniciou o curso de Doutorado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa (UFV), na área de Pré-Processamento e Armazenagem de Produtos Agrícolas, submetendo-se à defesa de tese, requisito indispensável para a obtenção do título de *Doctor Scientiae*, em fevereiro de 2006.

ÍNDICE

	Página
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
CAPÍTULO 1	
EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO E ENTALPIA DE VAPORIZAÇÃO DO FEIJÃO.....	4
1.1. INTRODUÇÃO.....	4
1.2. MATERIAL E MÉTODOS	7
1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
1.4. CONCLUSÕES.....	17
CAPÍTULO 2	
PROPRIEDADES FÍSICAS DO FEIJÃO DURANTE A SECAGEM.....	19
2.1. INTRODUÇÃO	19
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	22
2.2.1. Porosidade.....	22
2.2.2. Massa específica aparente e unitária	23
2.2.3. Massa de 1000 grãos	24
2.2.4. Forma e tamanho	24
2.2.5. Índice de contração da massa de grãos	26
2.2.6. Índice de contração volumétrica unitária	27

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
2.3.1. Porosidade	29
2.3.2. Massa específica aparente e unitária	30
2.3.3. Massa de 1000 grãos	32
2.3.4. Forma e tamanho	33
2.3.5. Índice de contração da massa de grãos.....	34
2.3.6. Índice de contração volumétrica unitária.....	35
2.4. CONCLUSÕES	44
CAPÍTULO 3	
MODELOS MATEMÁTICOS PARA A SECAGEM DO FEIJÃO.....	46
3.1. INTRODUÇÃO	46
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	51
3.2.1. Curvas de secagem	51
3.2.2. Determinação do coeficiente de difusão	53
3.2.2. Influência da temperatura	55
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
3.3.1. Curvas de secagem	55
3.3.2. Coeficiente de difusão	64
3.4. CONCLUSÕES	68
CAPÍTULO 4	
EXPANSÃO VOLUMÉTRICA E MODELAGEM MATEMÁTICA DO FEIJÃO DURANTE A EMBEBIÇÃO	70
4.1. INTRODUÇÃO.....	70
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	71
4.2.1. Forma e tamanho	72
4.2.2. Expansão volumétrica	73
4.2.3. Modelagem matemática da embebição	75
4.2.4. Coeficiente de difusão	76
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4.3.1. Forma e tamanho	77
4.3.2. Expansão volumétrica	80
4.3.3. Modelagem matemática da embebição	84

4.3.4. Coeficiente de difusão	87
4.4. CONCLUSÕES	89
CAPÍTULO 5	
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE TECNOLÓGICA E PROTÉICA DO FEIJÃO DURANTE O ARMAZENAMENTO	91
5.1. INTRODUÇÃO	91
5.2. MATERIAL E MÉTODOS	94
5.2.1. Classificação do produto	95
5.2.2. Grau de infestação	95
5.2.3. Teor de água	95
5.2.4. Porosidade	96
5.2.5. Massa específica aparente	96
5.2.6. Coloração dos grãos	96
5.2.7. Tempo de cocção	98
5.2.8. Condutividade elétrica	98
5.2.9. Absorção de água	99
5.2.10. Determinação das proteínas	99
5.2.11. Digestibilidade protéica	99
5.2.12. Análises estatísticas	100
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	100
5.3.1. Classificação do produto	100
5.3.2. Grau de infestação	101
5.3.3. Teor de água	102
5.2.4. Porosidade	104
5.3.5. Massa específica aparente	105
5.3.6. Coloração dos grãos	105
5.3.7. Tempo de cocção	107
5.3.8. Condutividade elétrica	108
5.3.9. Absorção de água	109
5.3.10. Determinação das proteínas	111
5.3.11. Digestibilidade protéica	112
5.4. CONCLUSÕES	113

CAPÍTULO 6	
COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS GRÃOS DE FEIJÃO	114
6.1. INTRODUÇÃO	114
6.2. MATERIAL E MÉTODOS	119
6.2.1. Teste de compressão durante a secagem	119
6.2.2. Propriedades mecânicas do feijão ao longo do armazenamento na presença do inseto-praga	121
6.2.2.1. Teste de compressão	122
6.2.2.2. Teste de compressão durante a embebição do produto em diferentes temperaturas	122
6.2.2.3. Teste de compressão durante a cocção do produto	123
6.2.2.4. Teste de punção durante a embebição do produto em diferentes temperaturas	123
6.2.2.5. Teste de punção durante a cocção do produto	123
6.2.3. Análises estatísticas	124
6.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	124
6.3.1. Teste de compressão durante a secagem	124
6.3.2. Propriedades mecânicas do feijão ao longo do armazenamento com a presença do inseto-praga	132
6.3.2.1. Teste de compressão	132
6.3.2.2. Teste de compressão durante a embebição do produto em diferentes temperaturas	135
6.3.2.3. Teste de compressão durante a cocção do produto	137
6.3.2.4. Teste de punção durante a embebição do produto em diferentes temperaturas	140
6.3.2.5. Teste de punção durante a cocção do produto	142
6.4. CONCLUSÕES	144
CONCLUSÕES GERAIS	146
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	151
APÊNDICE A	165
APÊNDICE B	172
APÊNDICE C	179

RESUMO

RESENDE, Osvaldo, D.S., Universidade Federal de Viçosa, Fevereiro de 2006.
Varição das propriedades físicas e mecânicas e da qualidade do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) durante a secagem e o armazenamento. Orientador: Paulo Cesar Corrêa. Conselheiros: Lêda Rita D'Antonino Faroni, Paulo Roberto Cecon e Maria Goreti de Almeida Oliveira.

Na literatura, existe carência de informações a respeito das alterações que podem ocorrer no feijão durante a secagem e o armazenamento. Dessa forma, torna-se relevante a execução de trabalhos referentes ao assunto, que possam gerar informações teóricas e práticas para a melhor conservação do produto. Assim, realizou-se este trabalho com a finalidade de analisar diversas características do feijão e ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais coletados durante a secagem e o armazenamento, para que possam ser utilizados como subsídio para estimar alterações na qualidade do produto. Para alcançar estes objetivos, procedeu-se à determinação das propriedades higroscópicas, físicas e mecânicas do feijão durante sua secagem e embebição (isotermas de dessecção, calor isostérico de dessecção, porosidade, massas específicas aparente e unitária, forma, tamanho, contração e expansão volumétrica, curvas de secagem, módulo proporcional de deformidade, teste de compressão e punção). Realizou-se, também, a avaliação da qualidade tecnológica e protéica do feijão (tempo de cocção, cor, absorção de água em diferentes temperaturas, condutividade elétrica, teor e digestibilidade de proteínas) durante o armazenamento, com a presença do inseto-praga *Acanthocelides obtectus* (Coleóptera, Curculionidae). De acordo com

os resultados obtidos, pôde-se concluir que: a) o equilíbrio higroscópico do feijão é diretamente proporcional à atividade da água decrescendo com o aumento de temperatura para uma mesma atividade de água, seguindo a mesma tendência da maioria dos produtos agrícolas já estudados, sendo o modelo de Halsey Modificado, o que melhor se ajustou aos dados experimentais; b) com a redução do teor de água, ocorre aumento da energia necessária para sua remoção do produto, variando os valores do calor isostérico integral de dessorção, para os grãos de feijão, na faixa de teor de água estudado, entre 2.718 e 3.961 kJ kg⁻¹; c) a redução do teor de água influencia as propriedades físicas dos grãos de feijão, proporcionando diminuição da porosidade e aumento da massa específica aparente e da massa específica unitária, que podem ser representadas adequadamente pelo modelo linear simples; d) os valores das massas específicas unitária e aparente, obtidos em função da composição química do produto, foram superiores aos valores experimentais até o teor de água de 0,22 (decimal b.s.); acima deste limite, os valores das massas específicas foram subestimados; e) a redução do teor de água influencia na contração volumétrica unitária e na massa dos grãos de feijão, provocando um decréscimo destes valores em 35,8 e 46,1%, respectivamente, na faixa de teor de água estudado; f) o modelo de Bala e Woods é o que melhor representa o fenômeno da contração volumétrica dos grãos de feijão durante o processo de secagem; g) os valores da esfericidade e das circularidades aumentam durante o processo de secagem, na faixa de teor de água estudado; h) o tempo necessário para a secagem do feijão até o teor de água de 0,13 (decimal b.s.) foi de 25, 10 e 5,5 horas, nas temperaturas de 35, 45 e 55 °C, respectivamente; i) os modelos de Page e Midilli são os que melhor representam o fenômeno de secagem do feijão; j) o coeficiente de difusão aumenta com a elevação da temperatura, apresentando valores entre $2,21 \times 10^{-10}$ e $9,08 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, e a introdução da contração volumétrica dos grãos no modelo da difusão líquida, durante a secagem, melhora a sua estimativa; k) os grãos de feijão, durante a embebição, expandem-se diferentemente nas direções radial e axial, com maior variação para o menor eixo; l) os modelos de Bala e Woods, Lang e Sokhansanj, Rahman e Linear descrevem adequadamente a expansão volumétrica do feijão; m) a taxa de absorção de água do feijão aumenta com a elevação da temperatura de embebição, sendo o modelo de Peleg recomendado para a descrição da cinética deste fenômeno, na faixa de temperatura testada; n) o coeficiente de difusão, durante o processo de embebição, apresenta valores de $1,07 \times 10^{-9}$; $1,30 \times 10^{-9}$; $1,58 \times 10^{-9}$ e $1,41 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C, respectivamente; o) a presença do inseto *A. obtectus* causa deterioração intensa do feijão, promovendo redução da massa específica

aparente e aumento da condutividade elétrica dos grãos, resultando na alteração da qualidade tecnológica do produto; p) o tempo de cocção dos grãos de feijão aumenta ao longo do período de armazenamento, independentemente da presença do inseto-praga; q) o teor de proteínas do feijão sem a presença do *A. obtectus* não se altera ao longo do armazenamento, entretanto, a digestibilidade de proteínas dos grãos de feijão não é afetada pela presença do inseto *A. obtectus* e pelo tempo de armazenamento; r) a força de compressão necessária para deformar o feijão diminui com o aumento do teor de água, apresentando, para as diversas deformações, valores entre 22,3 e 551,7 N para a posição de repouso, 10,5 e 253,1 N para a compressão com o hilo na horizontal e 11,6 e 143 N para a compressão com o hilo na posição vertical; s) o módulo proporcional de deformidade aumenta com a redução do teor de água e da deformação do produto, obtendo-se valores, na faixa de teor de água estudado, entre 4,1 e 71,3 x 10⁷ Pa, dependendo da posição do grão ao ser comprimido; t) os grãos de feijão apresentam maior resistência à compressão quando submetidos a esforços na posição natural de repouso; u) a infestação pelo inseto-praga, ao longo do armazenamento, interfere no comportamento mecânico dos grãos de feijão, resultando em menor resistência do produto à aplicação de forças; v) o aumento da temperatura de embebição promove um acréscimo da elasticidade do tegumento dos grãos de feijão, requerendo maior força para sua ruptura; w) com o aumento do tempo de cocção e da deterioração dos grãos pelo inseto-praga, ocorre a diminuição da resistência à compressão e da força máxima de punção dos grãos de feijão.

ABSTRACT

RESENDE, Osvaldo, D.S., Universidade Federal de Viçosa, February 2006. **Variation in either the physical and mechanical properties and the quality of the bean (*Phaseolus vulgaris* L.) during the drying process and storage.** Adviser: Paulo Cesar Corrêa. Committee members: Lêda Rita D'Antonino Faroni, Paulo Roberto Cecon and Maria Goreti de Almeida Oliveira.

There is a lack of information in the available literature on the changes that may occur in the bean during the drying process and storage time. Thus, the accomplishment of studies that would generate theoretical and practical information about a better conservation of the product are really relevant. So, this work was carried out to analyze several characteristics of the bean, as well as to adjust different mathematical models to the experimental data collected during the drying process and storage period, which could be used as subsidy to estimate the changes in the quality of the product. Thus, the following hygroscopic, physical and mechanical properties of the beans during their drying and soaking processes were determined: desorption isotherms, desorption isosteric heat, porosity, both unitary and apparent specific masses, forms, size, volumetric contraction and expansion, drying curves, proportional deformity module, compression and puncture test). The technological and protein qualities of the bean were also evaluated: cooking time, color, water absorption at different temperatures, electric conductivity, content and digestibility of proteins during storage in presence of the pest-insect *Acanthocelides obtectus* (Coleoptera, Curculionidae). According to the results, the following conclusions were drawn: a) the hygroscopic equilibrium of the bean is directly proportional to the activity of the water, as decreasing with the

increased temperature for a same activity of water, as following the same tendency of the most agricultural products already researched, and the Modified Halsey's model showing to be a better adjustment to the experimental data; b) with the reduced water content, there occurs an increase in the energy required for its removal from the product, as varying the values of the isosteric integral heat of desorption for the bean grains within the water content range from 2,718 to 3,961 kJ kg⁻¹; c) the reduction in the water content affects the physical properties of the bean grains, by providing a decrease in porosity but an increase in both the apparent specific mass and unitary specific mass that could be appropriately represented by the simple linear model; d) the values of both unitary and apparent specific masses obtained as a function of the chemical composition of the product were above the experimental ones up to the water content of 0.22 (decimal d.b.), since above this limit the values of the specific masses were underestimated; (e) the reduction in the water content affects either the unitary volumetric contraction and the grain mass of the bean, therefore causing a respective decrease of 35.8 and 46.1% in these values within the water content range under study; f) the model by Bala and Woods provides the best representation of the volumetric contraction phenomenon in bean grains during the drying process; g) the values of either sphericity and circularities are increased within this water content range during the drying process; h) the times required for drying the bean up to a water content of 0.13 (decimal d.b.) were 25, 10 and 5.5 hours at the temperatures of 35, 45 and 55 °C, respectively; i) the models by Page and Midilli show the best representation for the bean drying phenomenon; j) the diffusion coefficient increases as the temperature increases, by showing values from 2.21×10^{-10} to $9.08 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, whereas the introduction of the volumetric contraction of the grains in the liquid diffusion model during the drying process improves its estimate; k) during soaking, the bean grains differently expand toward the radial and axial directions, showing a higher variation in the lowest axis; l) the models by Bala and Woods, Lang and Sokhansanj, and Rahman as well as the Linear one show an adequate description for the volumetric expansion of the bean; m) the water absorption rate of the bean increases as the soaking temperature is increased, and the Peleg's model is recommended for describing the kinetics of this phenomenon at the temperature range under test; n) during the soaking process, the diffusion coefficient presents values of 1.07×10^{-9} ; 1.30×10^{-9} ; 1.58×10^{-9} and $1.41 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ at the temperatures of 20, 30, 40 and 50 °C, respectively; o) the presence of the *A. obtectus* insect causes intense deterioration in the bean, therefore promoting either a reduction in the apparent specific mass and increase in the electric conductivity of the grains, so

resulting into alteration in the technological quality of the product; p) the cooking time of the bean grains increases during the storage period, independently from the presence of the insect-pest; q) in the absence of *A. obtectus*, the protein content of the bean is not changed during the storage time, but the digestibility of the bean grain proteins is not affected by the presence of this insect neither by the storage time; r) the compression strength needed to deform the bean is decreased as the water content increases, therefore presenting values between 22.3 and 551.7 N for the repose position, and 10.5 and 253.1 N for compression with the hilum at horizontal position, but 11.6 and 143 N for compression with the hilum at vertical position; s) the proportional deformity module is increased as the water content and the product deformation are reduced, so obtaining values from 4.1 to 71.3×10^7 Pa within the water content range under study, as depending on the position of the grain when compressed; t) the bean grains showed higher resistance to the compression when subjected to efforts at the natural repose position; u) the infestation by the insect-pest during storage interferes into the mechanical behavior of the bean grains, therefore resulting into lowest resistance of the product to the applied strengths ; v) the increased soaking temperature promotes an increment in the elasticity of the bean grain tegument, therefore requiring higher strength for its rupture; w) with the increase in either the cooking time and the deterioration of the grains by the insect-pest there occurs a decrease in both resistance to the compression and maximum puncture strength of the bean grains.

INTRODUÇÃO GERAL

O feijão é cultivado em quase todos os países de clima tropical e subtropical, sendo de suma importância na alimentação humana, devido, fundamentalmente, ao seu baixo custo e por ser um alimento balanceado nutricionalmente. Nas classes menos favorecidas é a principal fonte de proteína, sendo utilizado em substituição a carnes e outros produtos protéicos, formando, juntamente com o arroz, sua base alimentar (Rios et al., 2003; Fernandes e Souza Filho, 2001).

Atualmente, devido às novas descobertas terapêuticas atribuídas ao feijão, seu consumo vem crescendo até mesmo em países onde era desconhecido. Estudos recentes indicam que o feijão pode ser capaz de reduzir os níveis de colesterol e atuar na prevenção de distúrbios cardiovasculares e vários tipos de câncer (Chiaradia e Gomes, 1997; EMBRAPA - Arroz e feijão, 2005).

O mercado mundial de feijão movimenta, anualmente, mais de dezoito milhões de toneladas, sendo o Brasil o principal produtor e consumidor (FAO, 2005; Agriannual, 2003). Na safra 2003/2004, a produção brasileira de feijão foi de três milhões de toneladas, com uma produtividade média de 700 kg ha⁻¹ (CONAB, 2005).

O Estado de Minas Gerais, historicamente, destaca-se como o segundo maior produtor de feijão do país, superado apenas pelo estado do Paraná. Na safra de 2003/2004, Minas Gerais foi responsável pela colheita de 453 mil toneladas, ou seja, 15,1% da produção nacional, com produtividade média de 1.040 kg ha⁻¹, valor superior à média do país (CONAB, 2005).

Segundo dados da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), estima-se que a cultura de feijão nas safras das águas e da seca, quando são mantidas as

condições tradicionais de cultivo, empregue, aproximadamente, 64 mil trabalhadores, entre mão-de-obra familiar, empregados permanentes e temporários, uma vez que é cultivado em praticamente todas as propriedades agrícolas do Estado (EPAMIG, 2005).

Recentemente o cultivo do feijão vem se transformando, deixando de ser apenas uma cultura de subsistência para se tornar uma cultura de alta tecnologia, com a utilização intensa de insumos. Para assegurar o retorno do investimento nesta atividade, além de todos os cuidados necessários na condução da lavoura, o produtor deve adotar técnicas que propiciem um produto final com qualidade superior.

O consumidor, geralmente, prefere feijões recém colhidos, pois apresentam características culinárias mais satisfatórias. A coloração, a capacidade de hidratação e o tempo de cozimento são fatores importantes que afetam a qualidade de grãos e estão altamente correlacionados (Guevara, 1990). O endurecimento dos grãos de feijão resulta em aumento da energia necessária à sua cocção, juntamente com a redução do valor nutricional, devido à deterioração das proteínas durante a armazenagem (Cordeiro, 2001). Tais fatores podem ser afetados pela constituição genética do grão, associados às condições ambientais de produção, processamento e armazenamento (Coelho, 1998).

Desta forma, faz-se necessária a adoção de técnicas apropriadas de colheita, beneficiamento e armazenagem do feijão, que garantam a manutenção das suas características desejáveis.

O ponto ideal de colheita é quando as plantas apresentam os grãos na sua melhor qualidade e com menor risco de perdas por debulha. As etapas de arranquio e enleiramento das plantas são realizadas quando os grãos se encontram com teor de água entre 0,22 e 0,25 (decimal b.s.). Depois destas etapas, as plantas são secas até os grãos atingirem, aproximadamente, o teor de água de 0,19 (decimal b.s.), quando devem ser trilhadas (Silva e Queiroz, 1998).

A secagem do feijão é o processo mais utilizado para assegurar sua qualidade e estabilidade, uma vez que as atividades biológicas e físico-químicas que ocorrem durante o armazenamento diminuem com a redução do teor de água dos grãos. Durante a secagem, as propriedades físicas e mecânicas do produto são influenciadas diretamente por este fenômeno. Assim, a correta determinação e modelagem destas características são de suma importância na otimização dos processos industriais, projeto e dimensionamento de equipamentos utilizados nas operações de colheita e pós-colheita.

Para efeito de comercialização, a armazenagem sob condições adequadas apresenta a vantagem de possibilitar ao produtor, suprir o mercado em épocas de escassez e com preços mais compensadores.

Durante o armazenamento e o processamento dos produtos agrícolas, ocorrem mudanças físicas, químicas e microbiológicas que podem depreciar a qualidade dos grãos. Segundo Fernandes e Souza Filho (2001) o armazenamento do feijão é, normalmente, realizado em condições inadequadas para a preservação de suas qualidades podendo ocorrer infestações de pragas, que causam perdas qualitativas e quantitativas, reduzindo os valores nutritivos e comercial do produto (Anderson et al., 1990).

Segundo Rios et al. (2003), o teor de água superior ao recomendado para o armazenamento seguro é uma das principais causas de perda das suas características tecnológicas. Para Bragantini (1996), os teores de água recomendados para minimizar perdas devem estar entre 0,14 e 0,16 (decimal b.s.).

Na literatura existe carência de informações a respeito das alterações que podem ocorrer no feijão durante a secagem e armazenagem. Desta forma, torna-se relevante à execução de trabalhos referentes ao assunto, que possam gerar informações teóricas e práticas para melhor conservação do produto.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como finalidade analisar diversas propriedades físicas e físico-químicas dos grãos de feijão e ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais, durante a secagem e a armazenagem para que pudessem ser utilizadas como subsídio para estimar alterações nestas propriedades e na qualidade do produto.

Para se alcançar estes objetivos o trabalho foi dividido em duas etapas distintas e complementares:

- determinação e modelagem das propriedades higroscópicas, físicas e mecânicas do feijão durante a secagem e embebição do produto (isotermas de dessorção, calor isostérico de dessorção, porosidade, massas específicas aparente e unitária, forma, tamanho, contração e expansão volumétrica, curvas de secagem, módulo proporcional de deformidade, teste de compressão e punção);

- avaliação da qualidade tecnológica e protéica do feijão durante o armazenamento com a presença do inseto-praga *Acanthocelides obtectus* (tempo de cocção, cor, absorção de água em diferentes temperaturas, condutividade elétrica, teor de proteínas e digestibilidade de proteínas).

CAPÍTULO 1

EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO E ENTALPIA DE VAPORIZAÇÃO DO FEIJÃO

1.1. INTRODUÇÃO

Durante o armazenamento do feijão, podem ocorrer mudanças físicas, químicas e microbiológicas que, dependendo da interação entre estes fatores e o ambiente, podem ocasionar perdas na sua qualidade. Assim, faz-se necessário o conhecimento das relações existentes entre o produto, a temperatura e a umidade relativa do ar, objetivando iniciativas e estudos com a finalidade de amenizar estas possíveis alterações.

Todos os produtos agrícolas têm a capacidade de ceder ou absorver água do ambiente, convergindo, constantemente, para uma relação de equilíbrio entre o seu teor de água e as condições do ar ambiente. O teor de água de equilíbrio é alcançado quando a pressão parcial de vapor de água no produto iguala-se à do ar que o envolve.

A relação entre o teor de água de um determinado produto e a umidade relativa de equilíbrio para uma temperatura específica pode ser expressa por meio de equações matemáticas denominadas isotermas ou curvas de equilíbrio higroscópico.

Para Hall (1980), as curvas de equilíbrio higroscópico são importantes para definir limites de desidratação do produto, estimar as mudanças do teor de água sob determinada condição de temperatura e umidade relativa do ambiente e para definir os teores de água adequados ao início de atividade de microrganismos que podem provocar a deterioração do produto.

A composição química do produto influencia diretamente no processo de sorção de água. Segundo Brooker et al. (1992), grãos com elevado teor de óleo adsorvem menor quantidade de água do ambiente do que os grãos com alto teor de amido. Além disso, a cultivar, o grau de maturidade e as condições físicas e sanitárias, bem como a maneira pela qual o equilíbrio foi obtido (adsorção ou dessorção), também são determinantes para o estabelecimento do teor de água de equilíbrio de produtos higroscópicos (Chen, 2000b; Fan et al., 2000).

As curvas de teor de água de equilíbrio podem ser obtidas experimentalmente por meio dos métodos dinâmico e estático. No método dinâmico, o grão é submetido a fluxos de ar sob condições controladas e fixas de temperatura e umidade relativa até que seja atingido o equilíbrio. No método estático, o equilíbrio higroscópico entre o produto e o ar ambiente sob condições controladas, é atingido sem movimentação do ar (Wang e Brennan, 1991; Jayas e Mazza, 1993; Chen, 2000b).

O comportamento higroscópico de diversos produtos agrícolas tem sido estudado por vários pesquisadores, que descrevem modelos distintos para expressar o teor de água de equilíbrio em função da temperatura e umidade relativa do ar. Entretanto, para o estabelecimento de isotermas que representam essa relação de equilíbrio, são utilizados modelos matemáticos empíricos, uma vez que nenhum modelo teórico desenvolvido tem sido capaz de estimar com precisão o teor de água de equilíbrio para uma ampla faixa de temperatura e umidade relativa do ar.

Atualmente, na literatura, existem mais de 200 equações propostas para representar o fenômeno de equilíbrio higroscópico dos produtos agrícolas. Estes modelos diferem na sua base teórica ou empírica e na quantidade de parâmetros envolvidos (Mulet et al., 2002).

Segundo Wang e Brennan (1991), para remover a água associada a um material higroscópico, a energia necessária é maior do que a utilizada para vaporizar igual quantidade de água livre, nas mesmas condições de pressão e temperatura. Esse adicional de energia, em virtude das forças de ligação entre a água e a superfície da substância adsorvente, é denominado calor isostérico de dessorção nos processos de secagem, constituindo-se em um bom parâmetro para estimar a quantidade mínima de calor exigida para remover uma quantidade de água do produto.

De acordo com Mulet et al. (1999), o teor de água, em que o calor isostérico de sorção é quase idêntico ao calor latente de vaporização da água livre, é geralmente considerado como um indicador do conteúdo de água livre no produto. Segundo Wang e Brennan (1991), o conhecimento do calor isostérico em função do teor de água de equilíbrio é essencial nos estudos de secagem e armazenamento de produtos agrícolas, servindo para estimar as

necessidades energéticas do processo de secagem, além de fornecer dados sobre o estado da água no produto.

Um método largamente usado para calcular o calor isostérico de sorção, seja pelo processo de adsorção ou pelo de dessorção, é dado pela equação de Clausius-Clayperon (Iglesias e Chirife, 1976), como mostrado a seguir:

$$\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial T} = \frac{q_{st}}{RT^2} \quad (1)$$

em que:

a_w : atividade de água, decimal;

T: temperatura absoluta, K;

q_{st} : calor isostérico líquido de sorção, kJ kg^{-1} ; e

R: constante universal dos gases, $8,314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, sendo para o vapor d'água $0,4619 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Integrando a Equação 1 e assumindo que o calor isostérico líquido de sorção seja independente da temperatura, pode-se encontrar o calor isostérico líquido de sorção para cada teor de água de equilíbrio, conforme a equação a seguir (Wang e Brennan, 1991):

$$\ln(a_w) = -\left(\frac{q_{st}}{R}\right) \cdot \frac{1}{T} + C \quad (2)$$

em que:

C: coeficiente do modelo.

De acordo com Brooker et al. (1992), as curvas de teor de água de equilíbrio higroscópico dos produtos biológicos fornecem as informações necessárias para o cálculo do calor isostérico integral de sorção, uma vez que para um dado teor de água de equilíbrio a determinada temperatura, tem-se uma umidade relativa de equilíbrio ou atividade de água correspondente. A atividade de água é dada pela relação entre pressão parcial de vapor de água em equilíbrio no produto e a pressão de vapor da água de saturação, à mesma temperatura.

O calor isostérico integral de sorção é a quantidade de energia necessária para evaporar uma unidade de massa de água contida no produto sob determinadas condições de secagem, sendo obtido adicionando aos valores de calor isostérico líquido de sorção, o valor do calor latente de vaporização da água livre de acordo com a seguinte expressão:

$$Q_{st} = q_{st} + L = a \cdot \exp(-b \cdot U_e^*) + L \quad (3)$$

em que:

Q_{st} : calor isostérico integral de sorção, kJ kg^{-1} ;

L: calor latente de vaporização da água livre, kJ kg^{-1} ;

U_e^* : teor de água de equilíbrio, % b.s.; e

a, b: coeficientes do modelo.

Diante da importância do conhecimento da higroscopicidade dos produtos agrícolas e dos requerimentos de energia necessários ao processo de secagem, objetivou-se neste trabalho, determinar as isotermas de sorção dos grãos de feijão para diversas condições de temperatura e atividades de água e ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais, selecionando aquele que melhor representa o fenômeno, bem como obter os valores do calor isostérico de dessorção em função do teor de água de equilíbrio do produto.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Laboratório de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas pertencente ao Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), localizado na Universidade Federal de Viçosa.

Para obtenção do teor de água de equilíbrio higroscópico dos grãos de feijão, foi utilizado o método dinâmico-gravimétrico. Foram utilizados grãos de feijão do grupo vermelho, cultivar vulgarmente denominado de “vermelhinho”, cultivados na safra de inverno do ano de 2003 no município de Cajuri-MG e colhidos manualmente, com teor de água de, aproximadamente, 92,0% (b.s.).

A secagem do produto, em camada delgada, foi realizada para condições controladas nas temperaturas de 25, 35, 45 e 55 °C e atividades de água entre 0,2 e 0,75 (decimal), até que o produto atingisse o teor de água de equilíbrio com a condição do ar especificada.

As condições ambientais para realização dos testes foram fornecidas por uma unidade condicionadora de atmosfera, de fabricação da empresa Aminco, modelo Aminco-Aire. Foram colocadas no interior do equipamento bandejas removíveis com fundo telado, para permitir a passagem do ar através da amostra, contendo cada uma 50 g de produto. O fluxo de ar foi monitorado com o auxílio de um anemômetro de lâminas rotativas e mantido em torno

de $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. A temperatura e a atividade de água foram monitoradas por meio de psicrômetro instalado próximo às bandejas contendo as amostras.

Durante o processo de secagem, as bandejas com o produto foram pesadas periodicamente e o equilíbrio higroscópico foi atingido quando a variação da massa dos recipientes permaneceu, aproximadamente, invariável durante três pesagens consecutivas. Os teores de água do produto foram determinados pelo método gravimétrico em estufa a 105 ± 1 °C, durante 24 horas, em três repetições (Brasil, 1992).

Aos dados experimentais do teor de água de equilíbrio, foram ajustados os modelos matemáticos freqüentemente utilizados para representação da higroscopicidade de produtos agrícolas, cujas expressões estão apresentadas no Quadro 1.

QUADRO 1. Modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de higroscopicidade de produtos agrícolas

Designação do modelo	Modelo	
Sigma Copace	$U_e^* = \exp \left\{ a - (b \cdot T) + \left[c \cdot \exp(a_w) \right] \right\}$	(4)
Sabbah	$U_e^* = a \cdot \left(a_w^b / T^c \right)$	(5)
Oswin	$U_e^* = (a + b T) / \left[(1 - a_w) / a_w \right]^{1/c}$	(6)
Henderson	$U_e^* = \left[\ln(1 - a_w) / (-a \cdot T + 273,16) \right]^{1/b}$	(7)
Henderson Modificado	$U_e^* = \left\{ \ln(1 - a_w) / [-a \cdot (T + b)] \right\}^{1/c}$	(8)
Halsey Modificado	$U_e^* = \left[\exp(a - b \cdot T) / -\ln(a_w) \right]^{1/c}$	(9)
GAB	$U_e^* = (a \cdot b \cdot c \cdot a_w) / \left[(1 - c \cdot a_w) \cdot (1 - c \cdot a_w + b \cdot c \cdot a_w) \right]$	(10)
Copace	$U_e^* = \exp \left[a - (b \cdot T) + (c \cdot a_w) \right]$	(11)
Chung Pfost	$U_e^* = a - b \cdot \ln \left[-(T + c) \cdot \ln(a_w) \right]$	(12)
BET	$U_e^* = \left\{ 1 / \left[(1 - a_w) \cdot \left(1/a \cdot b + ((a-1)/a \cdot b) \right) \right] \right\}$	(13)

em que:

U_e^* : teor de água de equilíbrio, % b.s.;

a_w : atividade de água, decimal;

T: temperatura, °C; e

a, b, c: coeficientes que dependem do produto e das condições do ar.

Para o ajuste dos modelos matemáticos, realizou-se a análise de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o programa computacional STATISTICA 5.0[®]. Os modelos foram selecionados considerando a significância dos coeficientes de regressão pelo teste t, adotando nível de 5% de probabilidade, a magnitude do coeficiente de determinação (R^2), a magnitude do erro médio relativo (P) e do erro médio estimado (SE) e a verificação do comportamento da distribuição dos resíduos. Considerou-se o valor do erro médio relativo inferior a 10% como um dos critérios para seleção dos modelos, de acordo com Mohapatra e Rao (2005). O erro médio relativo e o erro médio estimado, para cada um dos modelos, foram calculados conforme as seguintes expressões:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (14)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (15)$$

em que:

Y: valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor estimado pelo modelo;

n: número de observações experimentais; e

GLR: graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

Os valores do calor isostérico líquido de dessorção (q_{st}), para cada teor de água de equilíbrio, foram obtidos por meio da Equação (2). Os valores de atividade de água, temperatura e teor de água de equilíbrio foram obtidos a partir das isotermas de dessorção dos grãos de feijão, utilizando o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Para o cálculo dos valores do calor isostérico integral de dessorção (Q_{st}), utilizou-se a Equação (3). O calor latente de vaporização da água livre, necessário ao cálculo de Q_{st} , foi obtido, utilizando-se a temperatura média (T) na faixa em estudo, em °C, por meio da seguinte expressão:

$$L = 2.502,2 - 2,39T \quad (16)$$

1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados médios do teor de água de equilíbrio higroscópico do feijão obtidos por dessorção para as temperaturas de 25, 35, 45 e 55 °C e atividade de água entre 0,23 a 0,75 (decimal) são apresentados no Quadro 2.

QUADRO 2. Valores médios do teor de água de equilíbrio (%b.s.) do feijão, obtidos pelo processo de dessorção, em função da temperatura (°C) e da atividade de água (decimal, $\pm 0,01$) do ar de secagem

Temperatura (°C)	Atividade de água do ar de secagem (decimal)					
	0,23	0,30	0,40	0,50	0,60	0,75
25	-	-	14,35	-	18,26	21,71
35	-	9,24	10,88	11,99	13,80	20,02
45	-	8,38	9,69	10,10	12,56	-
55	6,39	7,45	8,74	9,52	-	-

No Quadro 3, são apresentadas as estimativas dos parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico para o feijão, obtidos por dessorção, para diferentes condições de temperatura e atividades de água.

Analisando os resultados apresentados no Quadro 3, observa-se que os modelos matemáticos utilizados para descrever a higroscopicidade do feijão apresentaram significância dos seus parâmetros de regressão ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t. Além disso, os modelos exibiram elevados valores do coeficiente de determinação (superior a 0,96), exceto os modelos de Henderson, GAB e BET. De acordo com o critério para seleção de modelos proposto por Mohapatra e Rao (2005), estes mesmos modelos - Henderson, GAB e BET -, não se ajustaram satisfatoriamente aos dados experimentais (erro médio relativo superior a 10%), indicando serem inadequados para a descrição do fenômeno estudado.

QUADRO 3. Estimativas dos parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico para o feijão, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), erros médios estimado (SE) e relativo (P) e tendência de distribuição dos resíduos

Modelos	Estimativas dos parâmetros*	R^2	SE	P (%)	Distribuição dos Resíduos
Sigma Copace	a = 1,6693 b = 0,0166 c = 0,8849	0,9815	0,626	3,97	Aleatória
Sabbah	a = 206,5358 b = 0,7640 c = 0,6264	0,9634	0,880	5,69	Tendenciosa
Oswin	a = 19,9325 b = -0,1961 c = 2,7627	0,9753	0,723	5,08	Aleatória
Henderson	a = 0,0001 b = 1,4023	0,8474	1,766	11,72	Tendenciosa
Henderson Modificado	a = 0,0003 b = -4,2253 c = 1,7271	0,9659	0,849	6,07	Tendenciosa
Halsey Modificado	a = 6,1927 b = 0,0348 c = 2,0973	0,9817	0,623	3,90	Aleatória
GAB	a = 6,8523 b = 17,6795 c = 0,9159	0,8435	1,932	11,91	Tendenciosa
Copace	a = 2,3788 b = 0,0167 c = 1,5352	0,9790	0,666	4,35	Aleatória
Chung Pfof	a = 31,3788 b = 6,1930 c = -7,6554	0,9665	1,039	8,18	Tendenciosa
BET	a = 0,1000 b = 0,1764	0,8074	1,985	11,70	Tendenciosa

* Todos os coeficientes estimados foram significativos a 5% de probabilidade pelo teste t

Nas Figuras 1 e 2, são apresentadas as tendências de distribuição de resíduos para os diversos modelos, em função dos valores estimados para o equilíbrio higroscópico do feijão. Os resíduos foram obtidos por meio da diferença entre os valores experimentais e os valores estimados por cada modelo.

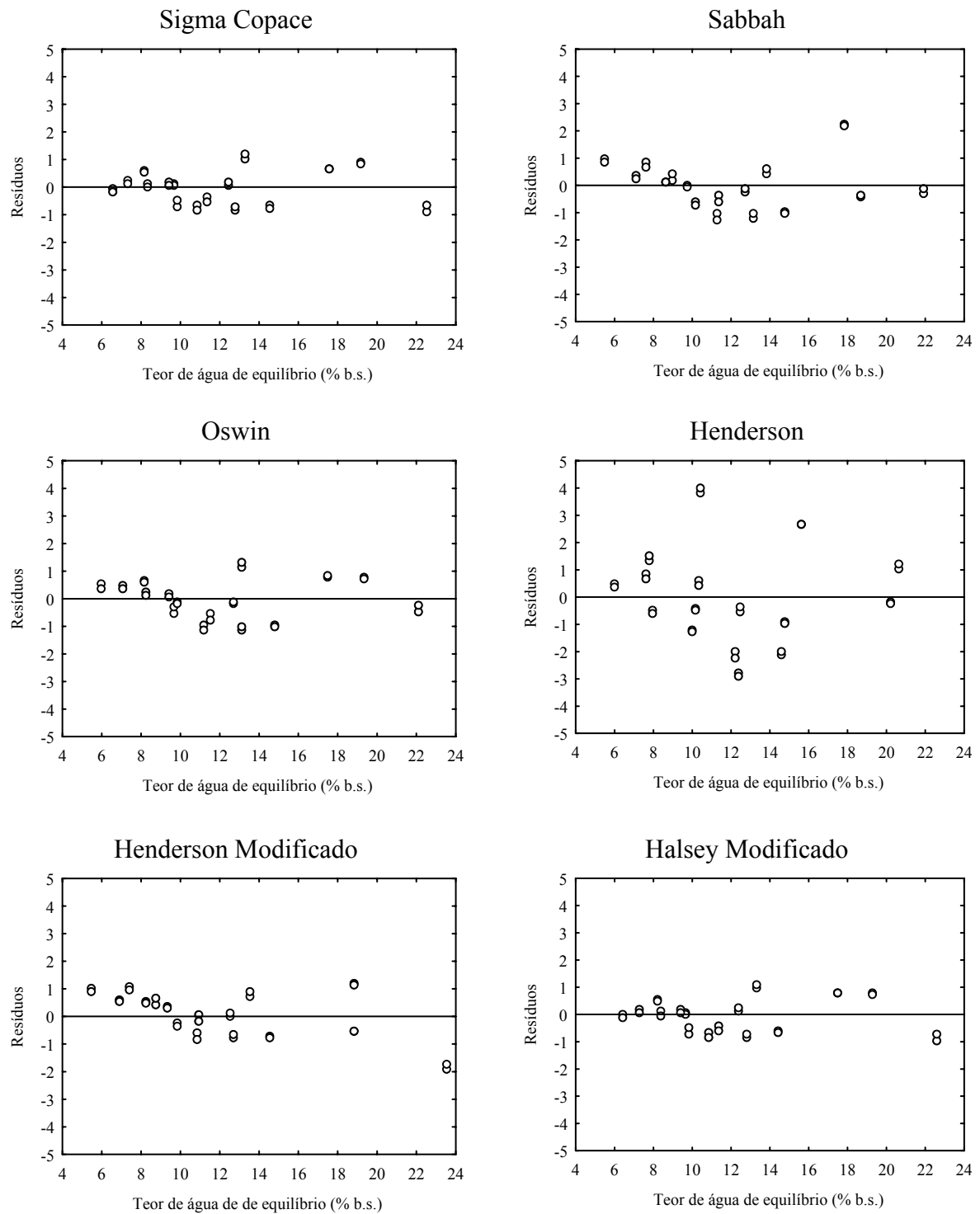


FIGURA 1. Tendência de distribuição dos resíduos para os modelos de Sigma Copace, Sabbah, Oswin, Henderson, Henderson Modificado e Halsey Modificado, em função dos valores estimados do equilíbrio higroscópico do feijão.

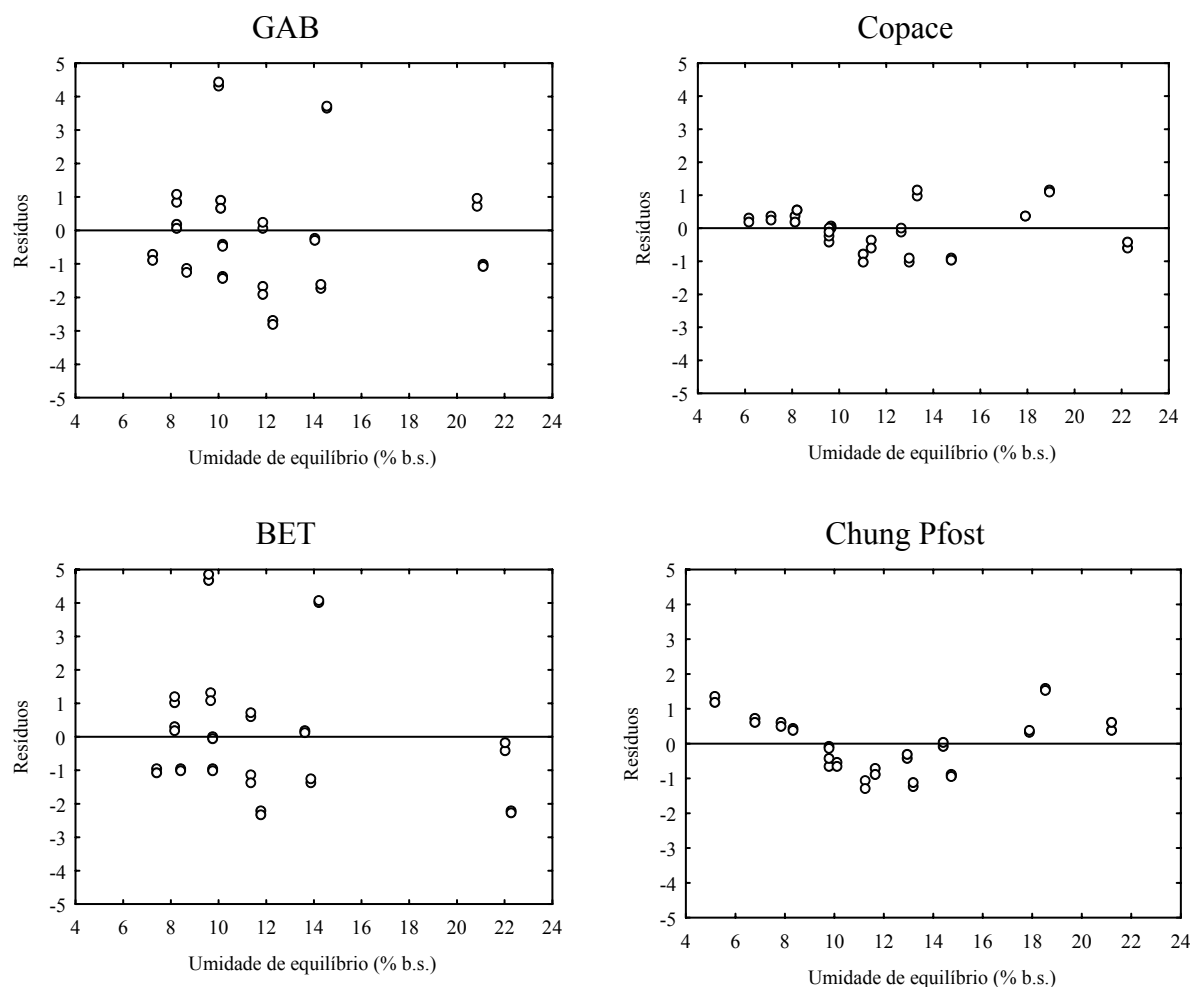


FIGURA 2. Tendência de distribuição dos resíduos para os modelos de GAB, Copace, BET e Chung Pfast, em função dos valores estimados do equilíbrio higroscópico do feijão.

De acordo com o Quadro 3 e Figuras 1 e 2, verifica-se que, dentre a série de modelos testados, apenas os modelos de Sigma-Copace, Oswin, Halsey Modificado e Copace apresentaram distribuição aleatória dos resíduos, indicando ajuste mais adequado aos dados experimentais. Dentre estes, o modelo de Halsey Modificado apresentou maior coeficiente de determinação e menores valores de erros médios relativo e estimado, sendo recomendado para predição do equilíbrio higroscópico dos grãos de feijão. Resultados semelhantes foram observados por Chen (2000a) e Chen e Morey (1989), que recomendam o modelo de Halsey Modificado para estimar o equilíbrio higroscópico de grãos de amendoim. Ajibola et al. (2003) observaram que o modelo de Henderson Modificado representou adequadamente o equilíbrio higroscópico do feijão macassar, e Oliveira et al. (2004) recomendaram os modelos de Henderson modificado e de Oswin Modificado para a descrição da higroscopicidade do feijão macassar verde.

Na Figura 3, são apresentados os valores experimentais do teor de água de equilíbrio do feijão, obtidos por dessorção, bem como suas isothermas calculadas pelo modelo de Halsey Modificado.

Observa-se que, para uma atividade de água constante, os valores do teor de água de equilíbrio diminuíram com o aumento da temperatura, seguindo a mesma tendência da maioria dos produtos agrícolas. Assim, a partir destas isothermas, pode-se manejar adequadamente o produto, visando à manutenção do seu teor de água nos níveis recomendados para o armazenamento seguro, que, de acordo com Bragantini (1996), situa-se entre 14 e 16 (% b.s.). Considerando que o feijão é, normalmente, armazenado em sacaria, o gráfico das isothermas de sorção pode ser empregado também para definir as regiões mais adequadas para seu armazenamento, considerando dados de temperatura e umidade relativa.

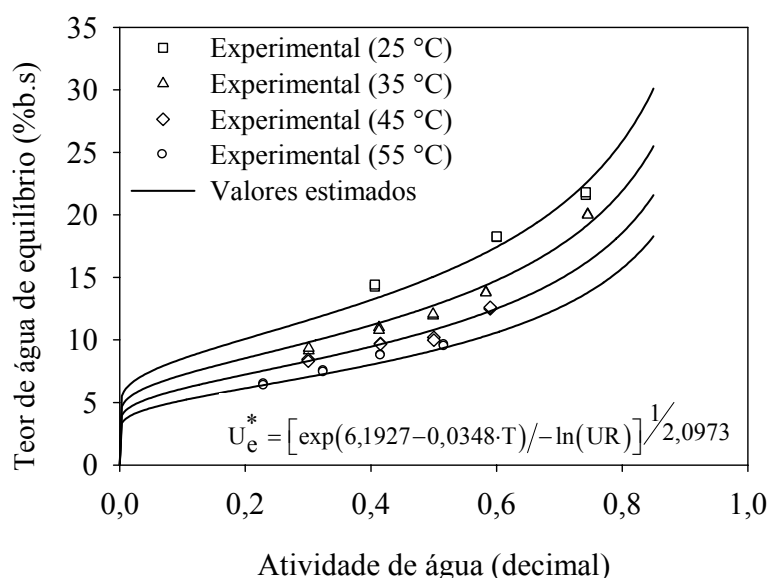


FIGURA 3. Valores, observados e estimados pelo modelo de Halsey Modificado, de teores de água de equilíbrio higroscópico do feijão, obtidos por dessorção, para diferentes condições de temperatura e atividades de água.

Diante da representação satisfatória do equilíbrio higroscópico dos grãos de feijão, o modelo de Halsey Modificado foi utilizado para o cálculo da atividade de água necessária para a determinação dos valores do calor isostérico líquido de dessorção.

No Quadro 4, são apresentadas as atividades da água, obtidas por meio do modelo de Halsey Modificado, para os grãos de feijão com teores de água de equilíbrio variando de 10,1 a 21,7% (b.s.) e para a faixa de temperatura de 25 a 55 °C.

QUADRO 4. Valores de atividade de água (decimal) estimados pelo modelo de Halsey Modificado em função da temperatura e do teor de água de equilíbrio

U _e (%b.s.)	Temperatura (°C)						
	25	30	35	40	45	50	55
10,10	0,20	0,26	0,32	0,39	0,45	0,51	0,57
10,88	0,25	0,32	0,38	0,44	0,50	0,56	0,62
11,99	0,33	0,39	0,45	0,51	0,57	0,63	0,67
12,56	0,36	0,43	0,49	0,55	0,60	0,65	0,70
13,80	0,43	0,50	0,56	0,61	0,66	0,71	0,75
14,35	0,46	0,52	0,58	0,63	0,68	0,72	0,76
18,26	0,63	0,68	0,72	0,76	0,79	0,82	0,85
20,02	0,68	0,73	0,76	0,80	0,83	0,85	0,87
21,71	0,72	0,76	0,80	0,83	0,85	0,87	0,89

Na Figura 4, são apresentadas as curvas do logaritmo neperiano da atividade de água (decimal), para valores específicos do teor de água de equilíbrio (% b.s.), em função de valores do inverso da temperatura absoluta do ar (K) para os grãos de feijão.

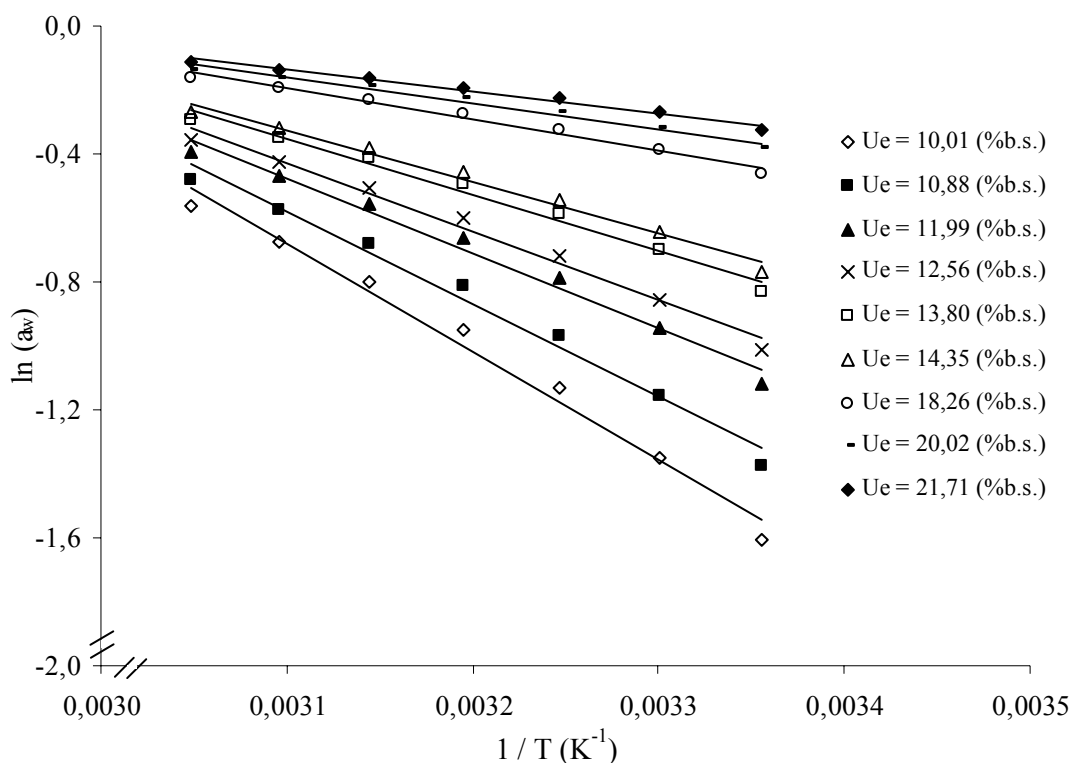


FIGURA 4. Curvas do logaritmo neperiano da atividade de água (decimal), para valores específicos do teor de água de equilíbrio (% b.s.), em função de valores de $1/T$ (K^{-1}) para os grãos de feijão.

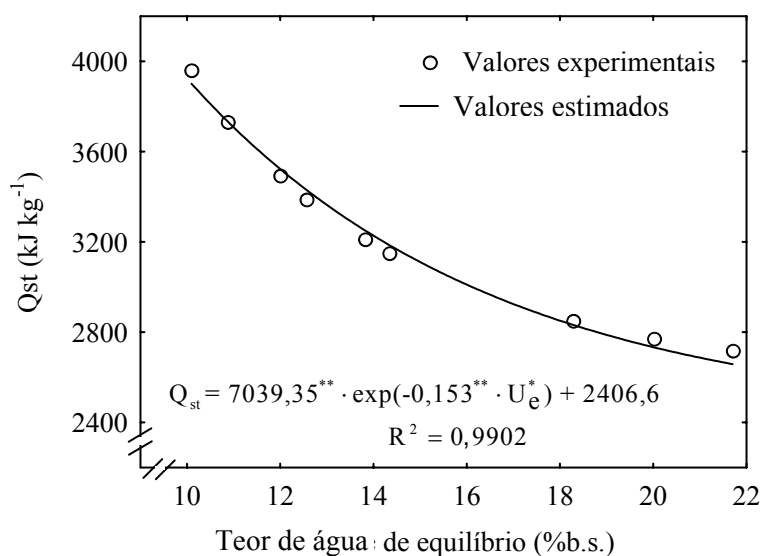
Os valores do calor isostérico líquido de desorção (q_{st}), em kJ kg^{-1} , para os grãos de feijão, em função do teor de água de equilíbrio (% b.s.), foram calculados de acordo com a Equação 2, representados, para cada situação, pelas inclinações das retas ilustradas na Figura 3 que estão apresentadas no Quadro 5.

QUADRO 5. Equações lineares do logaritmo neperiano da atividade de água (decimal), em função do inverso da temperatura absoluta ($1/T, \text{K}^{-1}$), para os diversos valores do teor de água de equilíbrio (% b.s.) dos grãos de feijão

U_e (% b.s.)	Equação linear	U_e (% b.s.)	Equação linear
10,10	$\ln a_w = 9,7557 - 3366,4 \cdot \frac{1}{T}$	14,35	$\ln a_w = 4,6704 - 1611,6 \cdot \frac{1}{T}$
10,88	$\ln a_w = 8,3464 - 2880,1 \cdot \frac{1}{T}$	18,26	$\ln a_w = 2,8176 - 972,26 \cdot \frac{1}{T}$
11,99	$\ln a_w = 6,8079 - 2349,2 \cdot \frac{1}{T}$	20,02	$\ln a_w = 2,3231 - 801,62 \cdot \frac{1}{T}$
12,56	$\ln a_w = 6,1761 - 2131,2 \cdot \frac{1}{T}$	21,71	$\ln a_w = 1,96 - 676,32 \cdot \frac{1}{T}$
13,80	$\ln a_w = 5,0694 - 1749,3 \cdot \frac{1}{T}$		

Para o calor isostérico integral de desorção (Q_{st}), em kJ kg^{-1} , foram adicionados, aos valores de q_{st} , o valor do calor latente de vaporização da água livre (L), que representa a quantidade mínima de energia necessária para evaporar a água, calculado para temperatura média de 40°C , resultando no valor de $2.406,60 \text{ kJ kg}^{-1}$.

Na Figura 5, são apresentados os valores do calor isostérico integral de desorção (Q_{st}), em função do teor de água de equilíbrio (% b.s.), estimados de acordo com a Equação 3.



**Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t.

FIGURA 5. Valores experimentais e estimados do calor isostérico integral de desorção em função do teor de água de equilíbrio

De acordo com a Figura 5, observa-se que, com a redução do teor de água, ocorre aumento da energia necessária para a remoção de água do produto, representada pelos valores do calor isostérico integral de dessorção (Q_{st}), conforme observado para diversos produtos agrícolas (Iglesias e Chirife, 1976; Mulet et al., 1999; Tolaba et al., 2004; Jayendra Kumar et al., 2005). Brooker et al. (1992) e Tagawa et al. (1993) afirmam que para retirar água de grãos com baixo teor de água é necessário uma quantidade de energia, em média, superior àquela necessária para produtos úmidos. Segundo Aviara e Ajibola (2002), estes resultados confirmam o fato de que nos produtos com maior teor de água, a força de ligação entre as moléculas de água e a matéria seca diminui sensivelmente.

Os valores de calor isostérico integral de dessorção, para os grãos de feijão, na faixa de teor de água de 10,1 a 21,7% (b.s.), variaram de 3.961 a 2.718 kJ kg⁻¹. Estes valores estão coerentes com os encontrados por Ayranci e Duman (2005), que, trabalhando com feijão caupi – *Vigna sinensis*, na faixa de teor de água de 4 a 16% (b.s.), obtiveram valores de calor isostérico integral de dessorção variando de 3361 a 2472 kJ kg⁻¹, aproximadamente.

As possíveis diferenças encontradas entre os valores observados de calor isostérico integral de dessorção, para os diferentes produtos, podem ser justificadas, além dos fatores inerentes aos próprios produtos, segundo Ferreira e Pena (2003), por possíveis erros na obtenção dos valores de atividade de água, para cada teor de água de equilíbrio, uma vez que os valores foram obtidos a partir de modelo matemático ajustado. Apesar destas discrepâncias, Zhang et al. (1996), estudando isoterms de sorção de água de alguns vegetais nas temperaturas de 30 a 60 °C, concluíram que o calor isostérico de dessorção pode ser utilizado para estimar a energia exigida no processo de desidratação de produtos agrícolas.

1.4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos no estudo do equilíbrio higroscópico e do calor isostérico de dessorção do feijão, pode-se concluir que:

- o teor de água de equilíbrio higroscópico do feijão é diretamente proporcional à atividade de água e decresce com o aumento de temperatura para uma mesma atividade de água, seguindo a mesma tendência da maioria dos produtos agrícolas já estudados;

- baseando-se em parâmetros estatísticos, o modelo de Halsey Modificado é o que melhor representa a higroscopicidade dos grãos de feijão do grupo vermelho, quando comparado aos modelos tradicionalmente utilizados para descrição deste fenômeno;

- com a redução do teor de água, ocorre aumento da energia necessária para a remoção de água do produto, sendo que os valores do calor isostérico integral de dessorção para os grãos de feijão, na faixa de teor de água estudado, variam entre 2.718 a 3.961 kJ kg⁻¹.

CAPÍTULO 2

PROPRIEDADES FÍSICAS DO FEIJÃO DURANTE A SECAGEM

2.1. INTRODUÇÃO

A secagem do feijão é o processo mais utilizado para assegurar a sua qualidade e estabilidade no armazenamento, inibindo o crescimento de microrganismos e reduzindo a taxa das reações enzimáticas e não enzimáticas.

A redução do teor de água dos grãos, além de provocar seu encolhimento, influencia diretamente a alteração das suas propriedades físicas durante a secagem. Desta forma, a correta determinação das propriedades físicas é de suma importância na otimização dos processos industriais, projeto e dimensionamento de equipamentos utilizados nas operações de colheita e pós-colheita.

Pesquisadores têm realizado estudos para a avaliação das principais propriedades físicas dos produtos agrícolas, demonstrando a sua aplicação prática em projetos de máquinas e estruturas. Recentes descobertas científicas têm melhorado a manipulação e o processamento dos materiais biológicos com a utilização de processos mecânicos, térmicos, elétricos, óticos, dentre outros, mas pouco se conhece sobre as características físicas dos produtos (Amin et al., 2004).

Inúmeros autores têm investigado as variações das propriedades físicas em função do teor de água e de outros fatores durante a secagem, para diversos produtos, como trigo e canola (Lang e Sokhansanj, 1993), batata desidratada (Mcminn e Magee, 1997), milho pipoca (Ruffato et al., 1999), lentilha (Amin et al., 2004), semente de abóbora (Paksoy e Aydin,

2004), milho (Baryeh, 2002), semente de quiabo (Sahoo e Srivastava, 2002), noz de caju (Balasubramanian, 2001), semente de algodão (Ozarslan, 2002), ervilha (Baryeh e Mangope, 2002), café (Chandrasekar e Viswanathan, 1999) e cacau (Bart-Plange e Baryeh, 2003), dentre outros.

A redução do teor de água de grãos é um fenômeno complexo, cujos mecanismos ainda não foram completamente elucidados (Ramos et al., 2005), envolvendo simultaneamente processos de transferência de calor e massa (Brooker et al., 1992). A modelagem matemática é essencial para simular o comportamento dos materiais submetidos a determinado processo. Assim, durante a secagem, a utilização de modelos matemáticos auxilia na execução de projetos e no dimensionamento de equipamentos, contribuindo para a melhor compreensão dos mecanismos envolvidos.

Os modelos empregados para representar a secagem dos produtos agrícolas, na sua grande maioria, foram desenvolvidos, negligenciando-se a contração volumétrica do produto durante o processo de desidratação (Brooker et al., 1992). Estas equações vêm sendo revisadas para incorporar esse parâmetro e melhor simular o processo e garantir a precisão dos resultados (Lang e Sokhansanj, 1993).

As variações volumétricas dos produtos, devido à sua desidratação, são relatadas como as principais causas das alterações das principais propriedades físicas dos produtos agrícolas (Ratti, 1994; Sokhansanj e Lang, 1996). Segundo Ramos et al. (2005) e Carmo e Lima (2004), estas modificações também devem ser incluídas nos modelos para uma completa descrição e análise do fenômeno.

Segundo Prado et al. (2000) e Mayor e Sereno (2004), a remoção de água durante a secagem dos produtos biológicos gera a redução da tensão existente no interior das células, causando estresse e promovendo, assim, a sua contração volumétrica.

Ratti (1994) e Zogzas et al. (1994) observaram que a contração volumétrica de produtos vegetais durante a secagem não é função exclusiva do teor de água, mas também dependente das condições ambientais do processo e da geometria e constituição do produto.

As bases teóricas para o conhecimento do processo de contração volumétrica envolvem complexas leis mecânicas e de deformação de materiais (Towner, 1987). No entanto, vários trabalhos têm sido desenvolvidos utilizando aproximações e modelos empíricos na tentativa de melhor representar esse complicado fenômeno em produtos de natureza biológica (Lang et al., 1994; Krokida e Maroulis, 1997; Afonso Júnior et al., 2000; Mayor e Sereno, 2004).

Khraisheh et al. (2004) observaram que a contração volumétrica dos produtos agrícolas durante a secagem ocorre de maneira heterogênea. No início da secagem,

aparentemente, o produto permanece com a estrutura intacta e mantém sua forma original. Entretanto, com a retirada de água, acontece o seu encolhimento que é acompanhado da deformação das partículas.

Corrêa et al. (2004a) modelaram a contração volumétrica dos frutos de café durante sua secagem. Os autores observaram que não foi possível ajustar um único modelo para as três cultivares estudadas, sendo os modelos de Bala e Woods, Linear e um modelo proposto pelos autores recomendados para a representação da contração volumétrica das cultivares Catuaí Vermelho, Mundo Novo e Conilon, respectivamente.

Na modelagem do processo de secagem de produtos agrícolas, diversos pesquisadores têm descrito os parâmetros que variam com a temperatura por meio da representação de Arrhenius (Madamba et al., 1996; Ozdemir e Devres, 1999; Azzouz et al., 2002; Ramesh, 2003; Ramos et al., 2004; Babalis e Belessiotis, 2004; Mohapatra e Rao, 2005), de acordo com a seguinte expressão:

$$k = k_0 \cdot \exp\left(\frac{E_a}{R \cdot T_a}\right) \quad (1)$$

em que:

k: parâmetro do produto que varia com a temperatura;

k_0 : fator pré-exponencial;

E_a : energia de ativação, kJ kmol^{-1} ;

R: constante universal dos gases, $8,314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$; e

T_a : temperatura absoluta, K.

Considerando a importância e a variabilidade existentes nas propriedades físicas dos produtos agrícolas de diferentes espécies e variedades, realizou-se esta pesquisa com o objetivo de determinar a massa de 1000 grãos, a porosidade e as massas específicas aparente e unitária, a forma, o tamanho e o índice de contração da massa de grãos de feijão ao longo do processo de secagem, bem com, ajustar modelos matemáticos aos valores experimentais. Paralelamente, analisaram-se diferentes metodologias de determinação da massa específica aparente e da massa específica unitária, e determinou-se o índice de contração volumétrica unitária dos grãos de feijão sob diversas condições de secagem, ajustando diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais e selecionando aquele que melhor representa o fenômeno.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas, pertencente ao Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), localizado na Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, MG.

Foram utilizados grãos de feijão do grupo vermelho, cultivar vulgarmente denominado de “vermelhinho”, cultivados na safra de inverno do ano de 2003 no município de Cajuri-MG e colhidos manualmente, com teor de água de, aproximadamente, 0,45 (decimal b.s.).

Posteriormente, o produto foi submetido à secagem em estufa com ventilação forçada, a uma temperatura de 40 °C. A redução do teor de água ao longo da secagem foi acompanhada pelo método gravimétrico (perda de massa), conhecendo-se o teor de água inicial do produto, até atingir o teor de água final de, aproximadamente, 0,11 (decimal b.s.), com auxílio de uma balança analítica com resolução de 0,01g.

Os teores de água do feijão foram determinados pelo método de estufa, a 105 ± 1 °C, durante 24 horas, em três repetições (Brasil, 1992).

Para cada teor de água obtido (0,43; 0,37; 0,31; 0,26; 0,21; 0,17; 0,14 e 0,11 decimal b.s.), o produto foi homogeneizado e encaminhado para determinação das propriedades físicas, utilizando-se três repetições.

2.2.1 Porosidade (ϵ)

A porosidade intergranular do feijão foi determinada utilizando-se um picnômetro eletrônico de comparação a ar, equipado com dispositivo automático da injeção de ar e controle da pressão (Figura 1), segundo o processo descrito por Day, citado por Mohsenin (1986).



FIGURA 1. Foto do picnômetro eletrônico de comparação a ar.

2.2.2 Massa específica aparente (ρ_{ap}) e unitária (ρ_u)

A massa específica aparente (ρ_{ap}), expressa em kg m^{-3} , foi determinada, utilizando-se uma balança de peso hectolítrico, com capacidade de um litro.

A massa específica unitária (ρ_u), expressa em kg m^{-3} , foi obtida em função da porosidade e da massa específica aparente de acordo com a equação descrita por Mohsenin (1986):

$$\rho_u = \frac{\rho_{ap}}{(1 - \varepsilon)} \quad (2)$$

em que:

ρ_{ap} : massa específica aparente, kg m^{-3} ;

ρ_u : massa específica unitária, kg m^{-3} ;

ε : porosidade, decimal.

Os resultados das massas específicas aparente e unitária foram comparados aos obtidos pelo cálculo da composição química média dos grãos de feijão, adaptando a metodologia descrita por Lewis (1993), de acordo com a seguinte expressão:

$$\rho = \frac{1 + U^*}{\left(\frac{U^*}{\rho_{ag}} \right) + \left(\frac{\omega_1}{\rho_1} \right) + \dots + \left(\frac{\omega_n}{\rho_n} \right)} \quad (3)$$

em que:

ρ : massa específica, kg m^{-3} ;

ρ_{ag} : massa específica da água, 1000 kg m^{-3} ;

U^* : teor de água do produto, decimal (b.s.);

$\rho_1 \dots \rho_n$: massa específica dos constituintes de 1 a n, kg m^{-3} ;

$\omega_1 \dots \omega_n$: teores dos constituintes do produto de 1 a n, decimal (b.s.).

Foram utilizados os teores médios dos componentes dos grãos de feijão, segundo o United States Department of Agriculture (1975), conforme o Quadro 1.

QUADRO 1. Composição química média dos grãos de feijão em 100 gramas do produto e massa específica dos componentes

Constituinte	Participação na composição química (mg)	Massa específica dos constituintes (kg m^{-3})
Água	16.540,0	1.000
Proteína	20.700,0	1.400
Carboidratos (Totais)	53.890,0	1.560
Vitaminas	-	-
Lipídios (Totais)	1.742,0	900
Minerais		
Cálcio	107,0	1.580
Fósforo	401,0	2.340
Ferro	5,15	7.865
Potássio	1.413,0	860
Cobre	0,788	8.875
Manganês	1,167	7.400
Magnésio	176,0	1.714
Sódio	17,0	970
Zinco	2,56	7.177

2.2.3 Massa de 1000 grãos (m_{1000})

A massa de 1000 grãos foi determinada para cada teor de água ao longo da secagem, utilizando-se uma balança eletrônica com resolução de 0,01 g, sendo os resultados expressos em kg.

2.2.4 Forma e tamanho

Para a determinação da forma e do tamanho, foi utilizado um lote de feijão com teor de água de, aproximadamente, 0,92 (decimal b.s.).

A forma e o tamanho dos grãos de feijão, considerados esferóides, foram analisados pela esfericidade, circularidades conforme o eixo e o volume, a partir das medidas das dimensões características, eixos ortogonais (Figura 2), em trinta grãos, obtidas por meio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm.

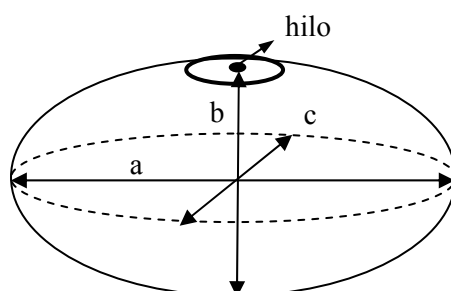


FIGURA 2. Desenho esquemático do grão de feijão, considerado esferóide oblato, com suas dimensões características

As circularidades do feijão foram calculadas para as três posições de projeção, maior eixo, eixo médio e menor eixo (Figura 3), por meio da seguinte expressão:

$$C_r = \frac{d_i}{d_c} \cdot 100 \quad (4)$$

em que:

C_r : circularidade, %;

d_i : diâmetro do maior círculo inscrito, mm; e

d_c : diâmetro do menor círculo circunscrito, mm.

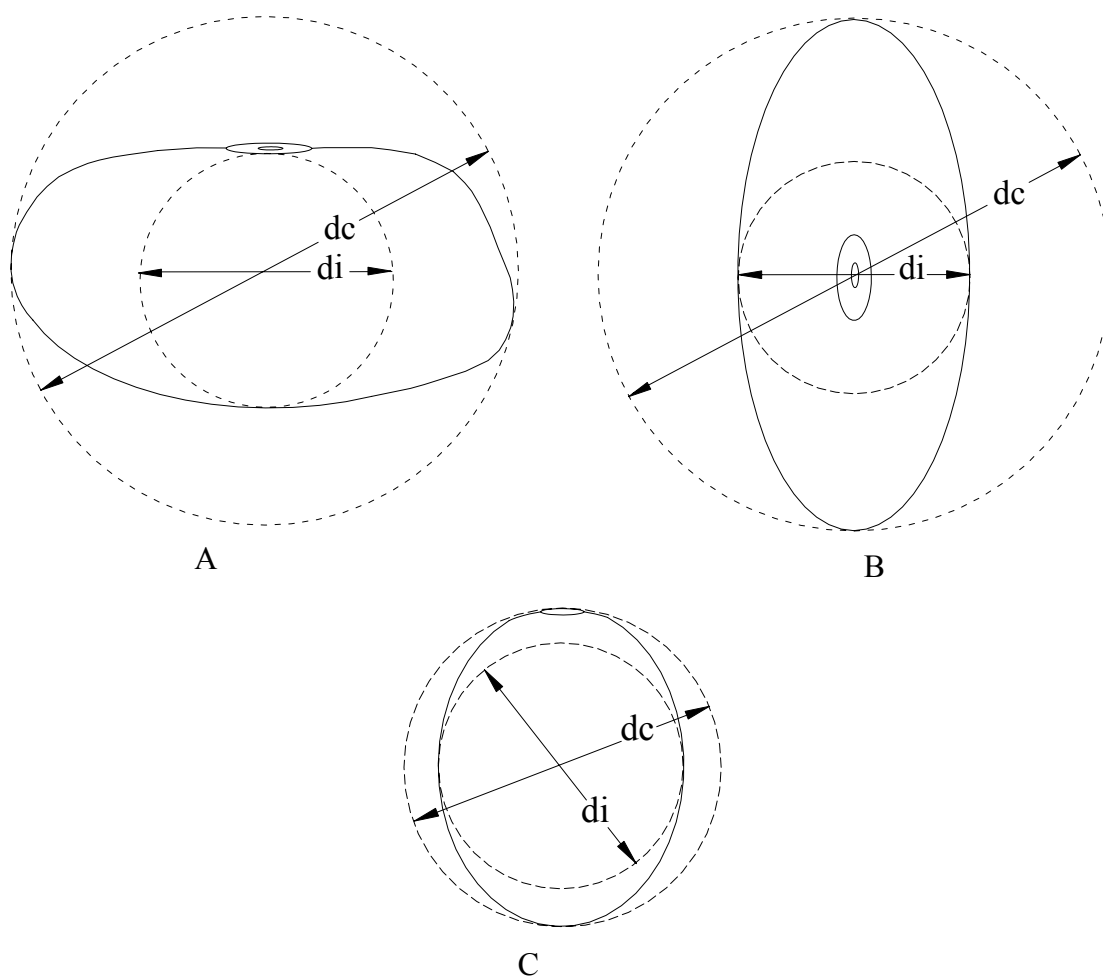


FIGURA 3. Representação dos grãos de feijão nas três posições de projeção, (A) maior eixo, C_{r1} ; (B) eixo médio, C_{r2} ; e (C) menor eixo, C_{r3} .

em que:

C_{r1} : circularidade em relação ao maior eixo, %;

C_{r2} : circularidade em relação ao eixo médio, %; e

C_{r3} : circularidade em relação ao menor eixo, %;

A esfericidade dos grãos de feijão foi determinada de acordo com a seguinte expressão descrita por Mohsenin (1986):

$$E_s = \left[\frac{(a \cdot b \cdot c)^{1/3}}{a} \right] \cdot 100 \quad (5)$$

em que:

- E_s : esfericidade, %;
- a: maior eixo do grão, mm;
- b: eixo médio do grão, mm; e
- c: menor eixo do grão, mm.

2.2.5 Índice de contração da massa de grãos (ψ_m)

O índice de contração volumétrica da massa de grãos durante a secagem do produto foi determinada pela relação entre o volume para cada teor de água e o volume inicial.

Para o acompanhamento da redução do volume da massa durante cada medição, o produto foi transferido para um cilindro de acrílico graduado, com capacidade de 0,001 m³.

Os valores da contração volumétrica da massa de grãos foram submetidos à análise de regressão e também comparados ao modelo proposto por Afonso Júnior et al. (2000), de acordo com a seguinte expressão:

$$\psi_m = \frac{V_m}{V_{m_0}} = \left(1 - \frac{U_o \cdot \rho_{apo}}{\rho_{ag}} - \varepsilon_o \right) / \left(1 - \frac{U \cdot \rho_{ap}}{\rho_{ag}} - \varepsilon \right) \quad (6)$$

em que:

- ψ_m : índice de contração volumétrica da massa de grãos, decimal;
- V_m : volume da massa granular, m³;
- V_{m_0} : volume inicial da massa granular, m³;
- U: teor de água do produto, decimal (b.u.);
- U_o : teor de água inicial do produto, decimal (b.u.);
- ρ_{apo} : massa específica aparente inicial da massa granular, kg m⁻³;
- ρ_{ap} : massa específica aparente da massa granular, kg m⁻³;
- ρ_{ag} : massa específica da água, 1000 kg m⁻³;
- ε : porosidade da massa granular, decimal; e
- ε_o : porosidade inicial da massa granular, decimal.

2.2.6 Índice de contração volumétrica unitária (ψ)

Para realização deste experimento, foram utilizados grãos de feijão do grupo vermelho, cultivar vulgarmente denominado de “vermelhinho”, colhidos manualmente, com teor de água de, aproximadamente, 0,92 (decimal b.s.).

A secagem do produto foi realizada em condições controladas, nas temperaturas de 25, 35, 45 e 55 °C e umidade relativa entre 23 e 75%, totalizando quatorze combinações das condições do ar. A secagem do feijão era interrompida quando o produto atingia o equilíbrio higroscópico com o ar.

As condições de temperatura e umidade relativa do ar foram proporcionadas, utilizando-se uma unidade condicionadora de atmosfera. O fluxo de ar foi monitorado com o auxílio de um anemômetro de lâminas rotativas e mantido constante em torno de $4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$. A temperatura e a umidade relativa do ar foram monitoradas por meio de psicrômetro instalado próximo às bandejas, contendo as amostras.

O índice de contração volumétrica unitária dos grãos durante a secagem do produto foi determinado pela relação entre o volume dos grãos para cada teor de água (V_g) e o volume inicial (V_{go}).

$$\psi = \frac{V_g}{V_{go}} \quad (7)$$

em que:

ψ : índice de contração volumétrica unitária dos grãos, decimal;

V_g : volume do grão para cada teor de água, m^3 ; e

V_{go} : volume inicial do grão, m^3 .

O volume de cada grão foi obtido por meio da medição dos três eixos ortogonais (comprimento, largura e espessura), em dez grãos ao longo da realização do processo de secagem, considerando-o como um esferóide oblato (Figura 2), como proposto por Mohsenin (1986), de acordo com a seguinte expressão:

$$V_g = \frac{\pi \cdot (a \cdot b \cdot c)}{6} \quad (8)$$

Aos dados experimentais do índice de contração volumétrica unitária, foram ajustados os modelos descritos pelas expressões listadas no Quadro 2.

QUADRO 2. Modelos utilizados para simular o índice de contração volumétrica de produtos agrícolas

Referência	Modelo	
Bala e Woods (1984)	$\psi = a \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-b \cdot (U^* - U_o^*) \right] \right\}$	(9)
Lang e Sokhansanj (1993)	$\psi = a + \beta_1 \cdot (U^* - U_o^*)$	(10)
Rahman (1995)	$\psi = 1 + \beta_2 \cdot (U^* - U_o^*)$	(11)
Corrêa et al. (2004a)	$\psi = 1 / \left(a + b \cdot \exp(U^*) \right)$	(12)
Linear	$\psi = a + b \cdot U^*$	(13)
Exponencial	$\psi = a \cdot \exp(b \cdot U^*)$	(14)

em que:

U^* : teor de água do produto, decimal (b.s.);

U_o^* : teor de água inicial do produto, decimal (b.s.);

$$\beta_1 = a + b \cdot (UR) + c \cdot (T) \quad (15)$$

a, b, c: parâmetros que dependem do produto;

UR: umidade relativa (decimal);

T: temperatura do ar (°C); e

β_2 : coeficiente de contração volumétrica, adimensional.

Para o ajuste dos modelos, foi realizada análise de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o programa computacional STATISTICA 5.0[®]. Para o grau de ajuste de cada modelo, considerou-se a significância dos coeficientes estimados, a magnitude do coeficiente de determinação (R^2 ou r^2 para regressão linear simples), a magnitude do erro médio relativo (P) e do erro médio estimado (SE) e a verificação do comportamento da distribuição dos resíduos. Os erros médios, relativo e estimado, para cada um dos modelos, foram calculados conforme as seguintes expressões:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (16)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (17)$$

em que:

Y: valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor estimado pelo modelo;

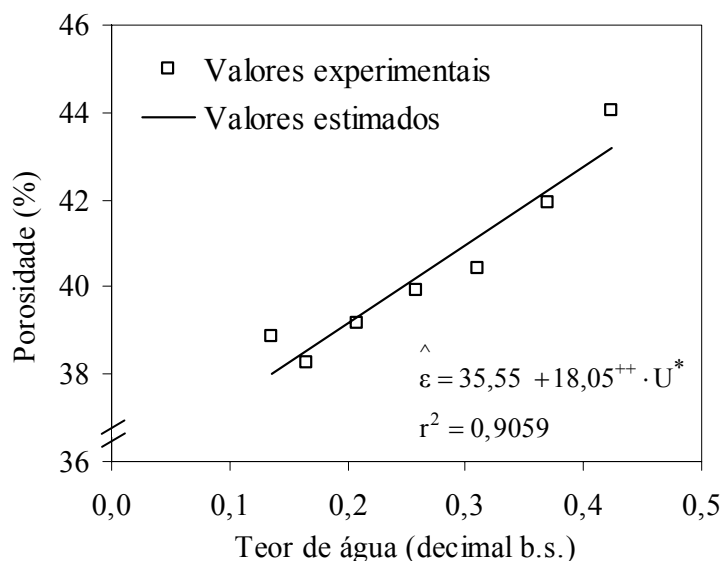
n: número de observações experimentais; e

GLR: graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Porosidade

Na Figura 4, são apresentados os valores experimentais e estimados da porosidade da massa de grãos de feijão, em função do teor de água (decimal b.s.).



⁺⁺Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t.

FIGURA 4. Valores experimentais e estimados da porosidade (ϵ) da massa de feijão em função do teor de água (U^*).

A porosidade da massa de grãos do feijão apresentou valores entre 38,3 e 44,1% para a faixa de teor de água estudado. Observa-se que a porosidade dos grãos de feijão apresenta comportamento semelhante ao da maioria dos produtos agrícolas, com redução em seus valores de, aproximadamente, 0,18% com a diminuição do teor de água de 0,01 (decimal b.s.). A regressão linear simples representa satisfatoriamente os valores experimentais, sendo

significativos a 1% de probabilidade pelo teste “t”, e apresentando elevado valor do coeficiente de determinação (r^2). Afonso Júnior et al. (2000) também constataram o mesmo comportamento linear para a porosidade dos grãos de milho durante a secagem, embora esses grãos tenham apresentado maiores valores de porosidade comparados aos do feijão. Este fato, possivelmente, seja devido ao grão de feijão apresentar maior tamanho em relação ao milho, proporcionando, para um mesmo volume, uma menor quantidade de espaços intergranulares.

2.3.2 Massa específica aparente e unitária

Nas Figuras 5 e 6, são representados os valores experimentais e estimados da massa específica aparente e unitária e os valores calculados em função da composição química do feijão, para os diferentes teores de água.

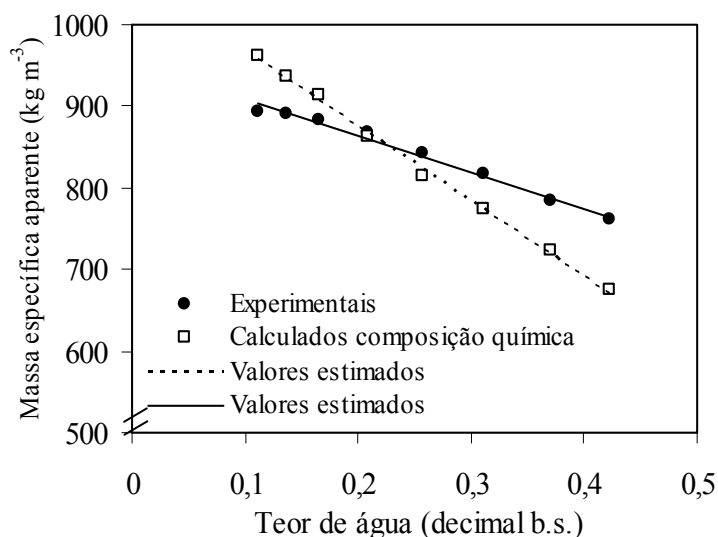


FIGURA 5. Valores experimentais e calculados da massa específica aparente (ρ_{ap}) dos grãos de feijão em função do teor de água.

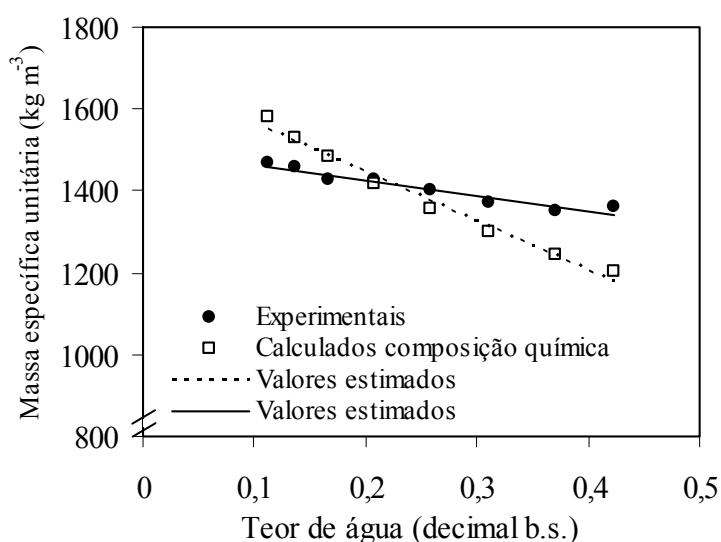


FIGURA 6. Valores experimentais e calculados da massa específica unitária (ρ_u) dos grãos de feijão, em função do teor de água.

Conforme as Figuras 5 e 6, verifica-se que, independentemente da metodologia utilizada, houve uma redução da massa específica aparente e da massa específica unitária dos grãos de feijão com o aumento do teor de água. Os valores experimentais da massa específica aparente e unitária para o feijão variaram de 893 a 761 kg m⁻³ e de 1.468 a 1.361 kg m⁻³, respectivamente, para o teor de água do produto variando de 0,42 a 0,11 (decimal b.s.). Estes resultados são coerentes com a maioria dos produtos agrícolas pesquisados (Chandrasekar e Viswanathan, 1999; Ruffato et al., 1999; Afonso Júnior et al., 2000; Corrêa et al., 2004b).

Os valores das massas específicas, obtidos em função da composição química do feijão, foram superiores àqueles obtidos experimentalmente até o teor de água de aproximadamente 0,22 (decimal b.s.). Acima desse limite, os valores das massas específicas foram subestimados quando se usou nos cálculos a composição química dos componentes do feijão. Corrêa et al. (2004b) calcularam as massas específicas aparente e unitária, utilizando os valores da composição química dos grãos de trigo e observaram que os valores estimados foram inferiores aos dados experimentais obtidos. Por outro lado, Afonso Júnior et al. (2000) e Lewis (1993), utilizando esta mesma metodologia para determinação da massa específica unitária do milho e da maçã, respectivamente, obtiveram resultados superiores aos obtidos experimentalmente. Assim, de acordo com os resultados encontrados na literatura e no presente trabalho, deve-se ressaltar que esta metodologia de determinação das massas específicas incorpora valores da composição química média do produto e apresenta discrepâncias nos resultados.

No Quadro 2, são apresentadas as equações lineares simples ajustadas aos valores da massa específica aparente e massa específica unitária (valores experimentais e calculados pela composição química do produto) e os coeficientes de determinação (r^2) com seus respectivos níveis de significância.

Analisando o Quadro 2, observa-se que a massa específica aparente do feijão diminuiu, aproximadamente, 4,43 kg m³ com o aumento do teor de água de 0,01 (decimal b.s.). Por outro lado, a massa específica unitária se reduziu em 3,79 kg m³ para um incremento do teor de água de 0,01 kg m³. Os valores experimentais da massa específica aparente e da massa específica unitária bem como os valores calculados com base na participação de cada componente químico do feijão podem ser, satisfatoriamente, representados por uma equação linear simples. Os coeficientes das equações lineares simples ajustados aos dados experimentais apresentaram elevada significância, comprovando que a massa específica do feijão decresce linearmente com o aumento do teor de água. O mesmo comportamento linear para a variação das massas específicas aparente e unitária durante a secagem foi observado

por Chandrasekar e Viswanathan (1999) para café, Afonso Júnior et al. (2000) para o milho, Aydin (2003) para castanha e Corrêa et al. (2004b) para o trigo.

QUADRO 2. Regressão linear simples ajustada aos valores experimentais de massa específica aparente (ρ_{ap1}) e calculados em função da sua composição química (ρ_{ap2}); valores experimentais de massa específica unitária (ρ_{u1}) e calculados em função da composição química (ρ_{u2}); e coeficientes de determinação (r^2) com seus respectivos níveis de significância

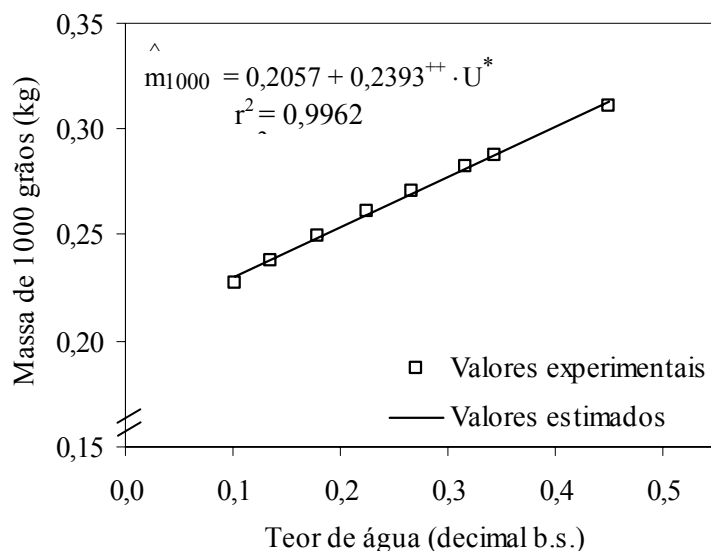
Equações de regressão	r^2	
Massa específica aparente		
$\rho_{ap1} = 952,62 - 443,82^{++} \cdot U^*$	0,9865	(18)
$\rho_{ap2} = 1061,0 - 921,26^{++} \cdot U^*$	0,9974	(19)
Massa específica unitária		
$\rho_{u1} = 1502,7 - 379,74^{++} \cdot U^*$	0,937	(20)
$\rho_{u2} = 1686,1 - 1195,8^{++} \cdot U^*$	0,9805	(21)

U^* : teor de água (decimal b.s.)

$^{++}$ Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t.

2.3.3 Massa de 1000 grãos

O efeito da variação do teor de água na massa de 1000 grãos de feijão é apresentado na Figura 7.



$^{++}$ Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t.

FIGURA 7. Valores experimentais e estimados da massa de 1000 grãos (m_{1000}) para o feijão, em função da redução do teor de água.

Analisando os resultados, verifica-se que, com a redução do teor de água de 0,45 para 0,11 (decimal b.s.), a massa de 1000 grãos variou de 0,311 a 0,227 kg. Nota-se que a massa de 1000 grãos do feijão diminuiu, aproximadamente, 0,0024 kg com a redução do teor de água de 0,01 (decimal b.s.). A equação linear simples representa adequadamente os dados experimentais, indicando pela significância a 1% de probabilidade pelo teste “t”, elevado valor do coeficiente de determinação (r^2). Os resultados encontrados no presente trabalho corroboram aqueles obtidos por outros pesquisadores que observaram comportamento semelhante para diversos produtos agrícolas (Baryeh, 2001; Baryeh, 2002; Kaleemullah e Gunasekar, 2002; Bart-Plange e Baryeh, 2003; Akinci et al., 2004; Amin et al., 2004).

2.3.4 Forma e tamanho

No Quadro 3, observa-se a variação dos eixos ortogonais dos grãos de feijão, das circularidades e da esfericidade em função do teor de água.

QUADRO 3. Dimensões médias dos eixos (“a”, “b” e “c”) ortogonais dos grãos de feijão, índices de redução (a/a_0 , b/b_0 e c/c_0), esfericidade (E_s) e as circularidades, segundo o maior eixo (C_{r1}), o eixo médio (C_{r2}) e o menor eixo (C_{r3})

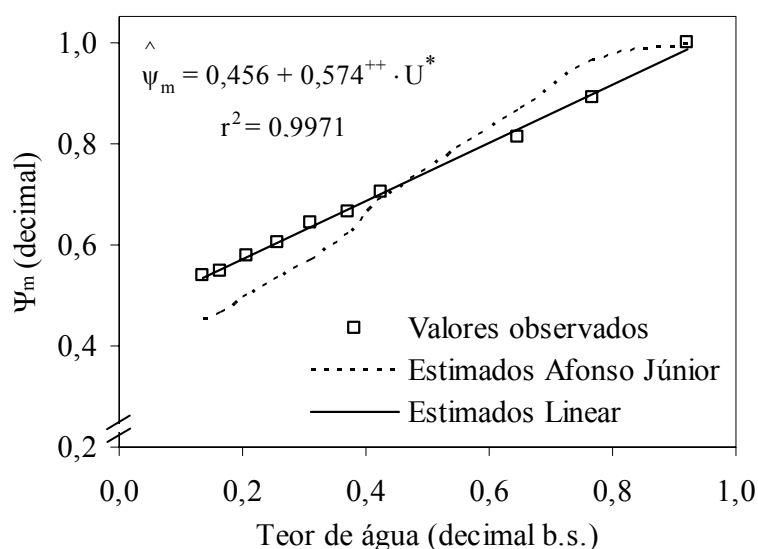
Teor de água (decimal b.s.)	Eixos ortogonais (mm)			a/a_0 (%)	b/b_0 (%)	c/c_0 (%)	C_{r1} (%)	C_{r2} (%)	C_{r3} (%)	E_s (%)
	a	b	c							
0,92	12,74	7,84	5,85	100,0	100,0	100,0	61,52	45,87	74,55	65,59
0,76	11,59	7,39	5,72	90,91	94,29	97,90	63,81	49,40	77,41	68,06
0,64	11,24	7,26	5,58	88,23	92,57	95,53	64,55	49,66	76,94	68,44
0,46	11,17	7,07	5,55	87,67	90,13	94,93	63,25	49,66	78,52	67,98
0,34	11,07	7,04	5,44	86,84	89,76	93,05	63,59	49,15	77,28	67,86
0,31	11,00	7,00	5,52	86,30	89,27	94,40	63,64	50,17	78,84	68,35
0,26	10,78	6,85	5,53	84,62	87,31	94,61	63,48	51,28	80,79	68,79
0,22	10,74	6,81	5,49	84,27	86,89	93,97	63,44	51,15	80,62	68,72
0,17	10,74	6,76	5,46	84,30	86,19	93,39	62,90	50,81	80,78	68,37
0,13	10,75	6,76	5,44	84,32	86,21	93,07	62,90	50,63	80,49	68,29
0,10	10,74	6,74	5,56	84,24	85,92	95,19	62,75	51,83	82,59	68,77

De acordo com o Quadro 3, observa-se que os três eixos ortogonais dos grãos de feijão diminuíram 15,76; 14,08 e 4,81%, respectivamente, para o maior, o médio e o menor eixo, com a redução do teor de água de 0,92 até 0,10 (decimal b.s.). Desta forma, verifica-se que os grãos de feijão apresentam variações desuniformes das suas dimensões características, como observado para a maioria dos produtos biológicos que, durante a secagem, contraem-se irregularmente nas diversas direções, fato observado por diversos pesquisadores (Fortes e Okos, 1980b; Kaleemullah e Gunasekar, 2002; Corrêa et al., 2002). Os valores da esfericidade e das circularidades nas três dimensões características aumentaram com a redução do teor de água do produto. Resultados semelhantes foram observados para sementes de algodão

(Ozarlan, 2002), milho (Baryeh, 2002), sementes de quiabo (Sahoo e Srivastava, 2002), sementes de linho (Sacilik et al., 2003) e sementes de cacau (Bart-Plange e Baryeh, 2003).

2.3.5 Índice de contração da massa de grãos

Na Figura 8, são apresentados os valores do índice de contração volumétrica da massa de grãos, experimentais e estimados, pelo modelo de Afonso Júnior e pela regressão linear simples.



⁺⁺Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t.

FIGURA 8. Valores do índice de contração volumétrica da massa de grãos, experimentais (Ψ_m) e estimados, pelo modelo linear simples e pelo modelo de Afonso Júnior, em função do teor de água para o feijão.

Analisando os resultados, verifica-se que os dados experimentais da massa de grãos apresentaram uma redução do volume inicial de 46,1%, com o teor de água variando entre 0,92 a 0,13 (decimal b.s.). O modelo linear simples representou satisfatoriamente os dados experimentais da contração volumétrica da massa de grãos, fato observado por Lang e Sokhansanj (1993) e Ribeiro et al. (2004) para grãos de trigo; e por Wang e Brennan (1991), Lang et al. (1994) e Afonso Júnior et al. (2000) para diversos produtos agrícolas.

Observa-se, ainda, na Figura 8, que, acima do teor de água de 0,45, o modelo proposto por Afonso Júnior superestimou os resultados, e abaixo deste teor de água houve subestimativa dos valores do índice de contração volumétrica da massa de grãos. Estas discrepâncias podem estar correlacionadas com a variabilidade das características físicas utilizadas no cálculo do índice de contração volumétrica.

2.3.6 Índice de contração volumétrica unitária

Os valores experimentais do índice de contração volumétrica unitária dos grãos de feijão durante a secagem nas diversas condições de temperatura e umidade relativa do ar são apresentados nos Quadros 4 e 5.

QUADRO 4. Valores experimentais do índice de contração volumétrica unitária (ψ , decimal) em função do teor de água (U^* , decimal b.s.), para as diferentes condições de umidade relativa e temperaturas de 25 e 35 °C, durante a secagem do feijão

Temperatura 25 °C							
40±1%		60±1%		75±1%			
U^*	ψ	U^*	ψ	U^*	ψ		
0,925	1,0000	0,914	1,0000	0,915	1,0000		
0,678	0,7838	0,683	0,8442	0,695	0,8469		
0,554	0,7390	0,569	0,7843	0,564	0,7672		
0,471	0,7124	0,486	0,7442	0,455	0,7059		
0,412	0,7104	0,423	0,7263	0,382	0,6859		
0,325	0,7041	0,336	0,7175	0,343	0,6788		
0,273	0,7050	0,287	0,7182	0,317	0,6725		
0,237	0,6867	0,193	0,7206	0,241	0,6692		
0,159	0,6903	0,184	0,7163	0,234	0,6692		
0,155	0,6830	0,178	0,7007	0,230	0,6616		
0,147	0,6807	0,179	0,6980	0,230	0,6651		
0,147		0,172	0,6987	0,225	0,6651		
	-	-	-	0,223	0,6558		
Temperatura 35 °C							
30±1%		50±1%		60±1%		75±1%	
U^*	ψ	U^*	ψ	U^*	ψ	U^*	ψ
0,915	1,0000	0,948	1,0000	0,941	1,0000	0,915	1,0000
0,690	0,8392	0,730	0,8243	0,753	0,8252	0,617	0,7746
0,528	0,7802	0,546	0,7439	0,572	0,7540	0,499	0,7417
0,429	0,7501	0,439	0,6898	0,430	0,7164	0,427	0,7098
0,364	0,7253	0,321	0,6774	0,370	0,7158	0,364	0,6901
0,285	0,7272	0,250	0,6628	0,287	0,7062	0,283	0,6708
0,131	0,6990	0,216	0,6599	0,240	0,6944	0,246	0,6644
0,122	0,6881	0,137	0,6486	0,152	0,6865	0,225	0,6552
0,101	0,6786	0,133	0,6391	0,149	0,6845	0,202	0,6649
0,100	0,6765	0,128	0,6326	0,144	0,6807	0,203	0,6620
0,095	0,6771	-	-	-	-	0,207	0,6591
-	-	-	-	-	-	0,203	0,6510

QUADRO 5. Valores experimentais do índice de contração volumétrica unitária (ψ , decimal) em função do teor de água (U^* , decimal b.s.), para as diferentes condições de umidade relativa e temperaturas de 45 e 55 °C, durante a secagem do feijão

Temperatura 45 °C							
30±1%		40±1%		50±1%		60±1%	
U^*	ψ	U^*	ψ	U^*	ψ	U^*	ψ
0,929	1,0000	0,935	1,0000	0,935	1,0000	0,927	1,0000
0,479	0,8179	0,489	0,7972	0,654	0,8271	0,543	0,8017
0,325	0,7942	0,333	0,7732	0,480	0,7418	0,382	0,7678
0,243	0,7852	0,246	0,7711	0,406	0,7349	0,296	0,7597
0,193	0,7899	0,198	0,7665	0,275	0,7228	0,236	0,7547
0,159	0,7883	0,146	0,7537	0,215	0,7254	0,151	0,7489
0,138	0,7838	0,123	0,7439	0,178	0,7063	0,137	0,7490
0,123	0,7689	0,113	0,7432	0,117	0,6849	0,126	0,7410
0,105	0,7551	0,099	0,7263	0,114	0,6860	0,125	0,7438
0,086	0,7544	0,097	0,7272	0,112	0,6805	-	-
0,087	0,7512	0,096	0,7203	-	-	-	-
0,086	0,7487	-	-	-	-	-	-
Temperatura 55 °C							
23±1%		40±1%		50±1%			
U^*	ψ	U^*	ψ	U^*	ψ	U^*	ψ
0,947	1,000	0,956	1,000	0,940	1,0000		
0,569	0,8046	0,603	0,7898	0,648	0,8293		
0,398	0,7557	0,419	0,7513	0,386	0,7228		
0,287	0,7546	0,275	0,7387	0,276	0,6943		
0,238	0,7581	0,192	0,7288	0,192	0,6768		
0,153	0,7490	0,145	0,7229	0,152	0,6721		
0,109	0,7467	0,120	0,7208	0,135	0,6613		
0,089	0,7325	0,110	0,7224	0,100	0,6481		
0,066	0,7083	0,097	0,7128	0,100	0,6479		
0,065	0,7065	0,092	0,7029	-	-		
-	-	0,087	0,6937	-	-		

Observa-se, nos Quadros 4 e 5, que a contração volumétrica unitária final dos grãos de feijão variou entre 0,75 e 0,63 para as diversas condições de secagem utilizadas, contração essa causada por uma redução do volume inicial dos grãos de 25 e 37%, em função direta do teor de água de equilíbrio específico para cada condição de temperatura e umidade relativa do ar. Afonso Júnior et al. (2004) verificaram uma diminuição de 39% do volume dos frutos de café cereja com a redução do teor de água de 2,27 até 0,11 (decimal b.s). Ramos et al. (2005)

observaram uma redução de 35% no raio médio dos frutos de uvas, considerados como esferas, durante o processo de secagem, e ressaltam que esta variação significativa na contração volumétrica do produto deve ser incluída nos modelos de transferência de massa. Observa-se também que a taxa de encolhimento dos grãos de feijão é maior no início da secagem, ou seja, para teores de água maiores. Para teores de água menores, o encolhimento não reflete com clareza a perda de água na secagem. Este comportamento pode ser explicado pela diminuição na mobilidade da matéria seca do produto que é, sensivelmente, reduzida para baixos teores de água (Mayor e Sereno, 2004).

Verifica-se, ainda, que não foi possível identificar uma tendência clara de variação do encolhimento dos grãos de feijão com a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Resultados semelhantes foram encontrados por Talha et al. (2004) estudando o encolhimento em banana durante a secagem sob diferentes condições do ar.

Nos Quadros 6 e 7, são apresentados os valores dos coeficientes de determinação, erro médio relativo e estimado e a tendência da distribuição de resíduos para os seis modelos analisados, durante a secagem do feijão nas diversas condições de temperatura e umidade relativa do ar.

Nas Figuras 9 e 10, são apresentadas as tendências de distribuição de resíduos para o modelo de Bala e Woods, em função dos valores estimados da contração volumétrica do feijão. Os resíduos foram obtidos por meio da diferença entre os valores experimentais e os valores estimados pelo modelo.

De acordo com o Quadro 6, observa-se que, para as quatorze combinações de temperatura e umidade relativa do ar utilizadas na secagem do feijão, o modelo de Bala e Woods (9) apresentou maiores valores do coeficiente de determinação (R^2) e menores magnitudes dos erros médio relativo e estimado, comparativamente aos demais modelos analisados. Verifica-se, ainda, no Quadro 7 e nas Figuras 9 e 10, que este modelo apresenta distribuição dos resíduos aleatória para todas as condições de secagem. Assim, o modelo de Bala e Woods se mostrou adequado para a descrição matemática do fenômeno de contração volumétrica unitária dos grãos de feijão. Corrêa et al. (2004a) também observaram que o modelo de Bala e Woods foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de contração volumétrica dos frutos de café durante a secagem.

QUADRO 6. Coeficientes de determinação (R^2 , decimal), erro médio estimado (SE, decimal) e erro médio relativo (P, %), para os seis modelos ajustados aos dados de contração volumétrica, durante a secagem do feijão nas diversas condições de temperatura (T, °C) e umidade relativa (UR, %) do ar

Temperatura de 25 °C													
UR		40±1%			60±1%			75±1%					
Modelo	R^2	SE	P	R^2	SE	P	R^2	SE	P	R^2	SE	P	
(9)	0,9998	0,010	0,848	0,9868	0,011	1,069	0,9924	0,010	0,905				
(10)	0,7455	0,049	4,461	0,8446	0,038	3,472	0,9337	0,031	2,662				
(11)	0,5491	0,065	6,206	0,7397	0,050	4,779	0,9001	0,038	3,399				
(12)	0,9111	0,029	2,824	0,9602	0,019	1,821	0,9909	0,011	0,989				
(13)	0,8446	0,038	3,472	0,8446	0,038	3,472	0,9337	0,031	2,662				
(14)	0,8767	0,034	3,213	0,8767	0,034	3,213	0,9585	0,024	2,207				
Temperatura de 35 °C													
UR		30±1%			50±1%			60±1%			75±1%		
Modelo	R^2	SE	P	R^2	SE	P	R^2	SE	P	R^2	SE	P	
(9)	0,9946	0,007	0,773	0,9967	0,007	0,752	0,9976	0,005	0,508	0,9793	0,015	1,267	
(10)	0,9124	0,030	2,883	0,9145	0,034	3,232	0,8558	0,038	3,384	0,8673	0,039	3,646	
(11)	0,8413	0,041	4,135	0,8563	0,044	4,261	0,7381	0,051	4,684	0,8126	0,046	4,475	
(12)	0,9920	0,009	0,998	0,9945	0,009	0,784	0,9673	0,018	1,722	0,9673	0,019	1,687	
(13)	0,9124	0,030	2,883	0,9145	0,034	3,232	0,8558	0,038	3,384	0,8673	0,039	3,646	
(14)	0,9386	0,025	2,479	0,9447	0,027	2,687	0,8873	0,033	3,103	0,9027	0,033	3,171	
Temperatura de 45 °C													
UR		30±1%			40±1%			50±1%			60±1%		
Modelo	R^2	SE	P	R^2	SE	P	R^2	SE	P	R^2	SE	P	
(9)	0,9675	0,014	1,268	0,9805	0,012	1,177	0,9867	0,011	1,239	0,9982	0,003	0,308	
(10)	0,9304	0,020	1,612	0,9385	0,020	1,670	0,9001	0,031	2,777	0,8855	0,026	2,849	
(11)	0,9188	0,022	1,547	0,9257	0,022	1,704	0,8500	0,038	3,481	0,8537	0,030	3,126	
(12)	0,9678	0,014	1,278	0,9806	0,011	1,226	0,9819	0,013	1,136	0,9774	0,012	1,269	
(13)	0,9304	0,020	1,612	0,9385	0,020	1,670	0,9001	0,031	2,777	0,8855	0,026	2,849	
(14)	0,9426	0,018	1,533	0,9532	0,018	1,553	0,9274	0,026	2,428	0,9109	0,023	2,533	
Temperatura de 55 °C													
UR		23±1%			40±1%			50±1%					
Modelo	R^2	SE	P	R^2	SE	P	R^2	SE	P	R^2	SE	P	
(9)	0,9446	0,021	2,119	0,9884	0,010	0,992	0,9987	0,004	0,455				
(10)	0,9228	0,025	2,165	0,8868	0,031	2,430	0,9725	0,018	2,038				
(11)	0,9171	0,026	2,022	0,8368	0,037	2,806	0,9612	0,022	2,330				
(12)	0,9380	0,023	2,036	0,9747	0,015	1,372	0,9953	0,008	0,834				
(13)	0,9228	0,025	2,165	0,8867	0,031	2,430	0,9725	0,018	2,038				
(14)	0,935	0,023	2,028	0,9101	0,027	2,229	0,9874	0,012	1,427				

QUADRO 7. Comportamento da distribuição dos resíduos, tendenciosa (Td) ou aleatória (A), para os seis modelos analisados, durante a secagem do feijão nas diversas condições de temperatura (T, °C) e umidade relativa (UR, %) do ar

Modelo	Temperatura (°C)													
	25 °C			35 °C				45 °C			55 °C			
	UR (%)			UR (%)				UR (%)			UR (%)			
	40	60	75	30	50	60	75	30	40	50	60	23	30	40
(9)	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
(10)	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td
(11)	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	A	Td
(12)	Td	A	A	A	Td	Td	Td	A	A	A	Td	A	Td	Td
(13)	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td
(14)	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td	Td

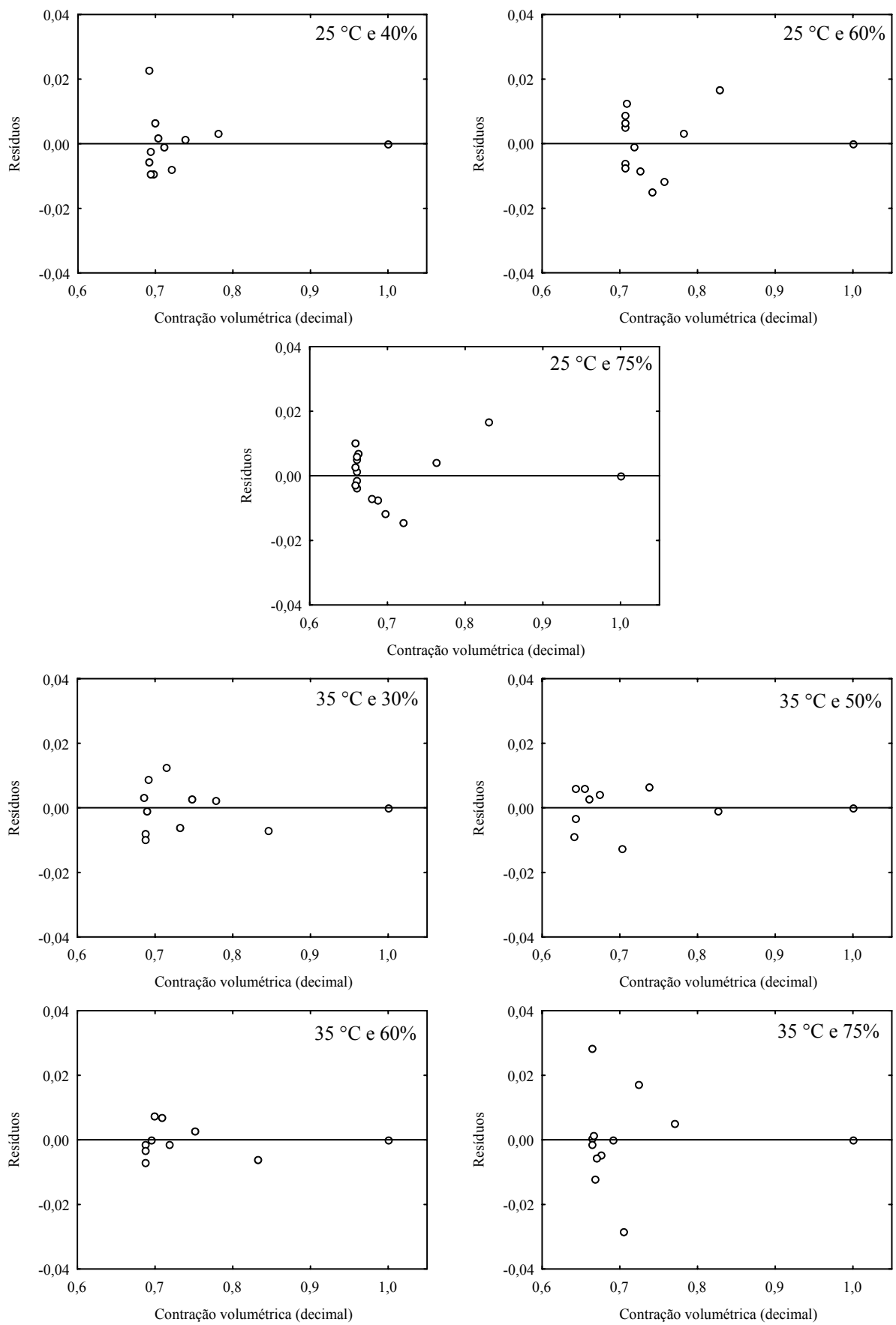


FIGURA 9. Tendência de distribuição dos resíduos para o modelo de Bala e Woods, durante a secagem do feijão, nas temperaturas de 25 e 35 °C e diversas umidades relativas do ar, em função dos valores estimados da contração volumétrica unitária.

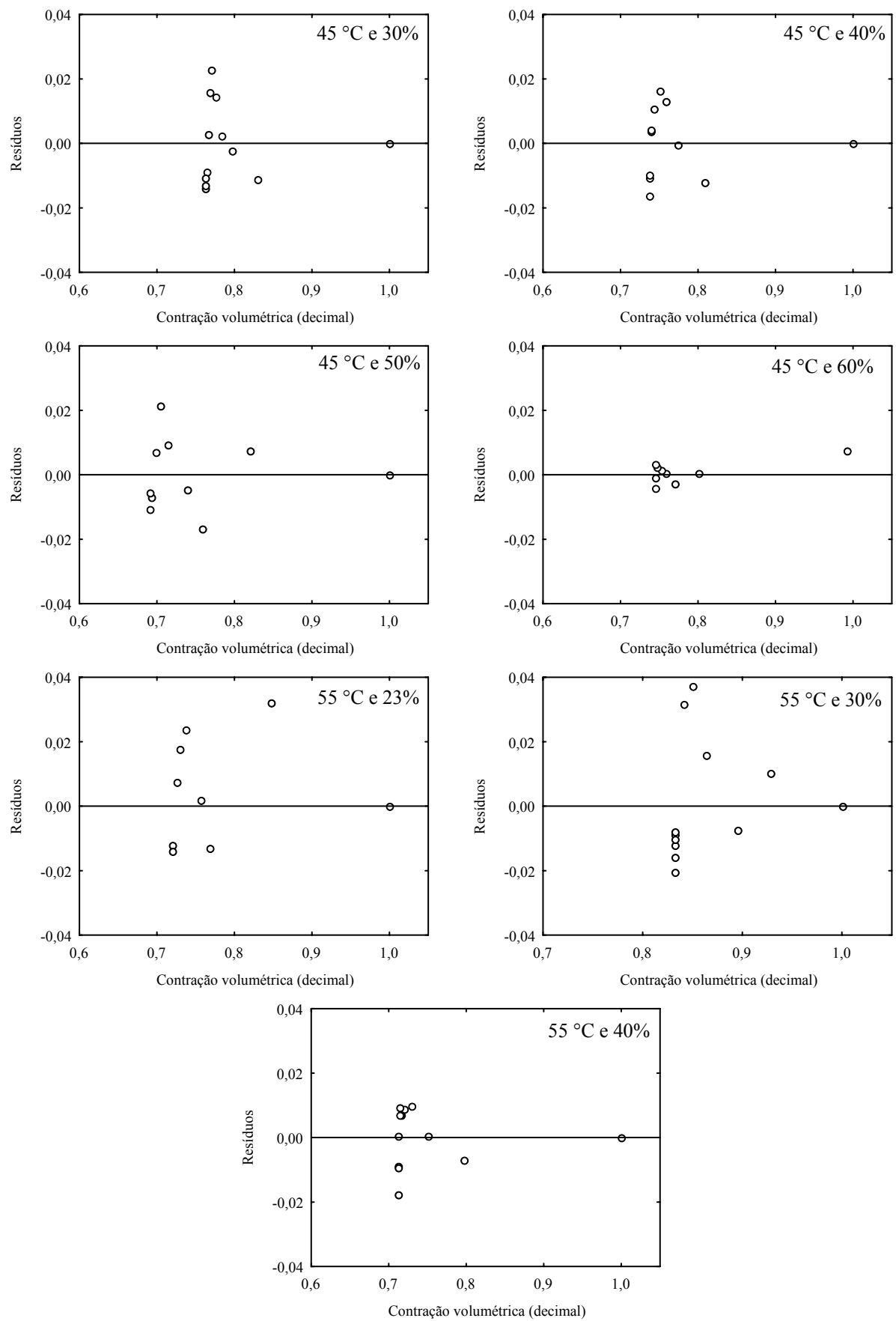


FIGURA 10. Tendência de distribuição dos resíduos para o modelo de Bala e Woods, durante a secagem do feijão, nas temperaturas de 45 e 55 °C e diversas umidades relativas do ar, em função dos valores estimados da contração volumétrica unitária.

Os coeficientes estimados para o modelo de Bala e Woods para descrição da contração volumétrica do feijão em diversas condições de temperatura e umidade relativa do ar de secagem são apresentados no Quadro 8. De um modo geral, observa-se que o coeficiente “a”, para o modelo de Bala e Woods, não apresenta uma tendência clara em função da temperatura e da umidade relativa do ar. Comportamento semelhante pode ser observado para o coeficiente “b”, para uma mesma temperatura, em relação à umidade relativa.

QUADRO 8. Coeficientes do modelo de Bala e Woods, ajustado para representação da contração volumétrica do feijão, em diversas condições de temperatura (T) e umidade relativa (UR) do ar de secagem

Condição do ar		Coeficientes		Condição do ar		Coeficientes	
T (°C)	UR (%)	a	b	T (°C)	UR (%)	a	b
25	40	0,3153**	4,8139**	45	30	0,2999**	1,8791**
	60	0,3208**	3,3399**		40	0,3247**	1,9853**
	75	0,4291**	2,2940**		50	0,3518**	2,5503**
35	30	0,3631**	2,4462**	55	60	0,2744**	3,2740**
	50	0,4083**	2,5664**		23	0,4534**	1,0880**
	60	0,3278**	3,8510**		40	0,3116**	2,9917**
	75	0,3729**	3,2275**		50	0,4877**	1,4822**

**Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t.

Desconsiderando a umidade relativa do ar, verifica-se que o valor médio do coeficiente “b”, para uma mesma temperatura, diminuiu com o aumento da temperatura do ar (Quadro 8), e sua influência no processo de contração volumétrica unitária durante a secagem do feijão pôde ser descrita por meio da equação de Arrhenius, como indicado na Figura 11.

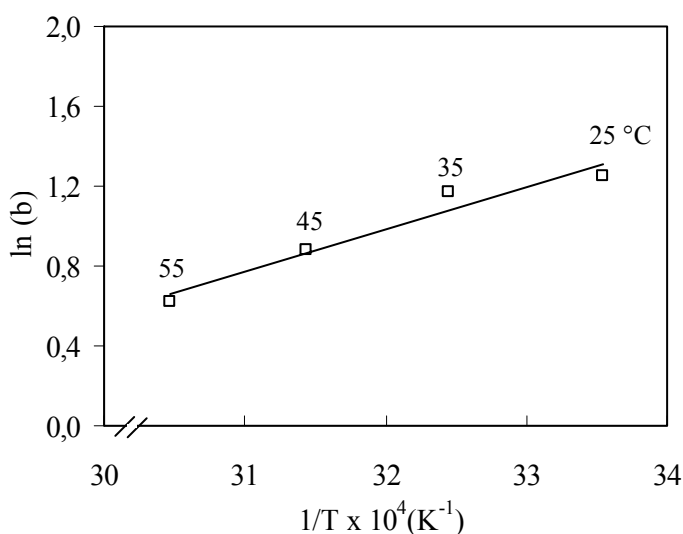


FIGURA 11. Representação de Arrhenius para o coeficiente “b” do modelo de Bala e Woods durante a secagem do feijão.

De acordo com a representação de Arrhenius, observa-se que o coeficiente “b” do modelo de Bala e Woods variou linearmente ao longo da secagem do feijão, evidenciando que a taxa de variação deste fenômeno manteve-se uniforme durante a faixa de temperatura estudada.

A Equação 22 apresenta as constantes da expressão ajustada para o coeficiente “b” do modelo de Bala e Woods, calculadas a partir da Equação 1, e utilizadas para descrição da contração volumétrica do feijão.

$$b = 0,00552 \cdot \exp\left(\frac{15736,5}{R \cdot T_a}\right) \quad (22)$$

A energia de ativação para o fenômeno de encolhimento do feijão foi de 15,74 kJ mol⁻¹, para a faixa de temperatura entre 25 e 55 °C, inferior aos dados encontrados dessa energia para a secagem de feijão em vagem, que foi de 39,47 kJ mol⁻¹ (Senadeera et al., 2003) e de 35,43 kJ mol⁻¹ (Doymaz, 2005a); para ervilha verde, de 28,40 kJ mol⁻¹ (Simal et al., 1996); e para soja, de 28,80 kJ mol⁻¹ (Kitic e Viollaz, 1984). Zogzas et al. (1996) ressaltam que a energia de ativação para a secagem de produtos agrícolas varia entre 12,7 a 110 kJ mol⁻¹.

Desta forma, utilizando o valor médio do coeficiente “a” do modelo Bala e Woods, estimado para as diversas condições de ar, o índice de contração volumétrica unitária do feijão, durante a secagem do produto na faixa de temperatura estudada, pode ser estimada por meio da expressão:

$$\psi = 1 - 0,36 \cdot \left(1 - \exp\left(-0,005523 \cdot \exp\left(\frac{15736,51}{8,314 \cdot (T + 273)} \right) \cdot (U^* - U_o^*) \right) \right) \quad (23)$$

Na Figura 12, são apresentados os valores da contração volumétrica unitária, experimentais e estimados, pelo modelo de Bala e Woods, representado pela Equação 23, durante a secagem do feijão, em diversas condições de temperatura e umidade relativa. Observa-se que o modelo de Bala e Woods, representado pelo modelo completo em função da temperatura de secagem, descreve adequadamente a contração volumétrica dos grãos de feijão.

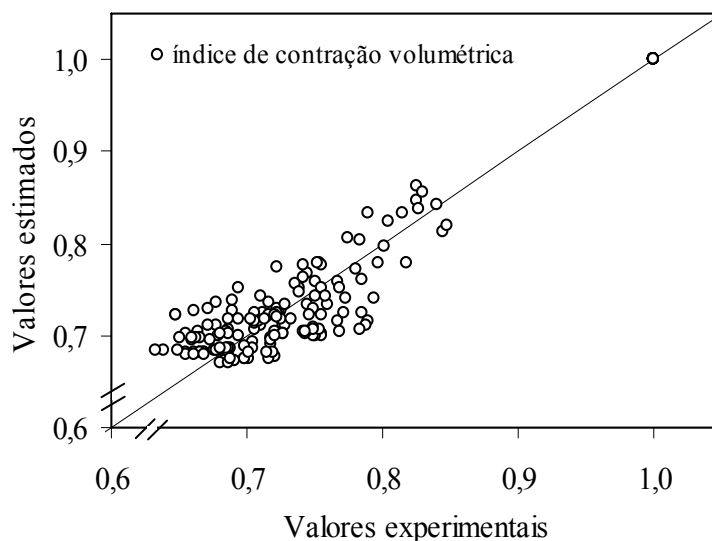


FIGURA 12. Valores da contração volumétrica unitária, experimentais e estimados, pelo modelo de Bala e Woods, representado pela Equação 23, durante a secagem do feijão em diversas condições de temperatura e umidade relativa.

2.4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- a redução do teor de água influencia as propriedades físicas dos grãos de feijão, proporcionando diminuição da massa de 1000 grãos e da porosidade e aumento das massas específicas aparente e unitária;
- o modelo de regressão linear simples representa satisfatoriamente as propriedades físicas dos grãos de feijão analisadas, em função do teor de água;
- os valores das massas específicas unitária e aparente obtidos em função da composição química do produto foram superiores aos dados experimentais até o teor de água de 0,22 (decimal b.s.); acima deste limite, os valores das massas específicas foram subestimados, evidenciando a limitação de uso desta metodologia;
- a redução do teor de água influencia a contração volumétrica unitária e a massa dos grãos de feijão, provocando a diminuição dos valores em 35,8 e 46,1%, respectivamente, para a faixa de teor de água estudado;

- a forma dos grãos é influenciada pela redução do teor de água, aumentando os valores da esfericidade e das circularidades durante o processo de secagem, para a faixa de teor de água estudado;

- a redução volumétrica dos grãos de feijão variou entre 25 e 37% durante a secagem, sendo função, basicamente, do teor de água final e, praticamente, independente das condições do ar de secagem; e

- o modelo de Bala e Woods, dentre aqueles testados, é o que melhor representa o fenômeno da contração volumétrica dos grãos de feijão durante o processo de secagem.

CAPÍTULO 3

MODELOS MATEMÁTICOS PARA SECAGEM DE FEIJÃO

3.1. INTRODUÇÃO

A água é o componente principal da maioria dos produtos agrícolas e tem uma ampla influência em suas propriedades. A secagem, por sua vez, é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade e a estabilidade dos grãos, considerando que a diminuição da quantidade de água do material reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento.

O fenômeno de redução do teor de água de grãos envolve, simultaneamente, a transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção do excesso de água por meio de evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido, podendo alterar de forma substancial sua qualidade, dependendo do método e das condições de secagem (Hall, 1980).

A conservação pela secagem baseia-se no fato de que tanto os microrganismos como as enzimas e todo o mecanismo metabólico necessitam de água para suas atividades. Com a redução da quantidade de água disponível até níveis seguros para armazenagem, serão reduzidos a atividade de água, a velocidade das reações químicas no produto e o desenvolvimento de microrganismos (Christensen e Kaufmann, 1974).

No estudo de sistemas de secagem, desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos, dimensionamento, otimização e determinação da viabilidade da aplicação comercial, é de fundamental importância a

simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água. Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que representa, satisfatoriamente, sua perda de água durante o período de secagem (Berbert et al., 1995). As curvas de secagem em camada delgada variam com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores.

Diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas. Embora várias teorias tenham sido propostas para prever o comportamento da secagem de grãos e sementes, na maioria das vezes, as relações semi-empíricas e empíricas têm sido as melhores opções para prever o processo de secagem, apesar de sua validade estar restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos (Brooker et al., 1992).

Estes modelos baseiam-se, geralmente, em variáveis externas em relação ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem., não fornecendo, entretanto, indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos grãos, considerando, ainda, que todo o processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente.

Brooker et al. (1992) relatam que a maioria dos modelos empregados para representar a secagem dos produtos agrícolas foi desenvolvida, negligenciando-se a importância da contração volumétrica do produto durante o processo de desidratação. Segundo Prado et al. (2000), a remoção de água durante a secagem dos produtos biológicos gera a redução da tensão existente no interior das células, promovendo, assim, a sua contração volumétrica. Para Ramos et al. (2005,) estas modificações também devem ser incluídas nos modelos para uma completa descrição e análise do fenômeno.

Os modelos semi-teóricos oferecem, freqüentemente, facilidade de uso, sendo válidos somente para as faixas de temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e teor de água em que eles foram obtidos. Dentre os modelos de secagem em camada fina, os mais utilizados são: Exponencial, Henderson e Pabis, Dois termos, Lewis, Page, Thompson e Wang e Sing (Mohapatra e Rao, 2005). Estes modelos têm como base a lei de resfriamento de Newton (Incropera e Dewitt, 1992) para transferência de calor por convecção, presumindo-se que, durante a secagem, as condições sejam isotérmicas e que a transferência de água seja restrita à superfície do produto (Brooker, 1992).

Recentemente, têm sido realizados inúmeros trabalhos com o objetivo de identificar as características de diversos produtos agrícolas durante a secagem como: feijão preto (Afonso Júnior e Corrêa, 1999), trigo (Sun e Woods, 1994), trigo parboilizado (Mohapatra e Rao,

2005), arroz em casca (Basunia e Abe, 2001), uva (Yaldiz, et al., 2001; Ramos et al., 2004; Ramos et al., 2005), pimenta (Kaymak-Ertekin, 2002; Akpinar et al., 2003) e pêra (Lahsasni et al., 2004), dentre outros.

A secagem envolve o movimento da água do interior para a periferia do grão por meio de mecanismos distintos. Vários autores têm proposto que o principal mecanismo de transporte de água seja a difusão líquida (Fortes e Okos, 1980a; Geankoplis, 1983). A difusão ocorre nos sólidos de estrutura fina e nos capilares, poros e nos pequenos orifícios cheios de vapor. Contudo, a teoria de difusão não considera o encolhimento, o endurecimento da casca e as isothermas de sorção (Barbosa-Cánovas e Veja-Mercado, 2000).

Os modelos de secagem baseados na teoria da difusão líquida têm merecido atenção especial por parte dos pesquisadores. A teoria da difusão líquida assume que não há influência da capilaridade e despreza os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro, dada a dificuldade de quantificar esses múltiplos efeitos na massa de produto, e também considera que os corpos entram em equilíbrio térmico com o ar instantaneamente, o que pode induzir discrepâncias entre os resultados encontrados.

O mecanismo da difusão líquida é muito complexo devido à diversidade da composição química e estrutura física dos produtos. Os dados disponíveis na literatura apresentam elevada variação nos seus valores, não só devido à complexidade dos produtos, como também em função dos diferentes métodos de estimação, tipo de material, teor de água, processo de secagem e metodologia utilizada para sua obtenção.

Segundo Brooker et al. (1992), na teoria da difusão líquida, a segunda lei de Fick tem sido utilizada para estabelecer a difusão da água em função do gradiente de concentração.

$$\frac{\partial U^*}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \frac{\partial U^*}{\partial x} \right) \quad (1)$$

em que:

U^* : teor de água do produto, decimal (b.s.);

D : coeficiente de difusão líquida, $m^2 s^{-1}$;

t : tempo, s; e

x : distância em relação a um ponto de referência no corpo, m.

A variação do teor de água em função do tempo de secagem, para materiais homogêneos com coeficiente de difusão constante, é representada pela seguinte equação:

$$\frac{\partial U^*}{\partial t} = D \cdot \left[\frac{\partial^2 U^*}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \cdot \frac{\partial U^*}{\partial r} \right] \quad (2)$$

em que:

r : distância radial ou espessura, m; e

$c = 0$ para corpos planos, 1 para corpos cilíndricos e 2 para corpos esféricos.

Várias soluções analíticas para a equação anterior, para diferentes formas geométricas, têm sido utilizadas para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas, assumindo-se as seguintes condições de contorno:

$$U^*(r, 0) = U_i^* \quad (3)$$

$$U^*(r, t) = U_e^* \quad (4)$$

em que:

U_i^* : teor de água inicial, (decimal b.s.);

U_e^* : teor de água de equilíbrio, (decimal b.s.).

Crank, citado por Brooker et al. (1992), apresenta as soluções analíticas para três formas geométricas:

- Placa plana infinita

$$RU = \frac{U^* - U_e^*}{U_i^* - U_e^*} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D \cdot t}{4} \cdot \left(\frac{S}{V} \right)^2 \right] \quad (5)$$

em que:

RU : razão de umidade do produto, adimensional;

n : número de termos;

S : área da superfície do produto, m^2 ; e

V : volume do produto, m^3 .

- Cilindro infinito

$$RU = \frac{U^* - U_e^*}{U_i^* - U_e^*} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_n^2} \exp \left[-\frac{\lambda_n^2 \cdot D \cdot t}{4} \cdot \left(\frac{2}{r} \right)^2 \right] \quad (6)$$

em que:

λ_n : raízes da equação de Bessel de ordem zero.

- Esfera

$$RU = \frac{U^* - U_e^*}{U_i^* - U_e^*} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-\frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot D \cdot t}{9} \cdot \left(\frac{3}{R} \right)^2 \right] \quad (7)$$

em que:

RU: razão de umidade do produto, adimensional;

R: raio equivalente, m;

U_e^* : teor de água de equilíbrio do produto, (decimal b.s.);

n: número de termos;

U_i^* : teor de água inicial do produto, (decimal b.s.).

A solução analítica dessa equação apresenta-se na forma de uma série infinita, podendo o número finito de termos (n) no truncamento determinar a precisão dos resultados.

Afonso Júnior e Corrêa (1999) avaliaram os resultados da secagem de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar Ouro Negro, com ajuste do modelo de difusão líquida para a forma geométrica esférica, com aproximação de oito termos, e verificaram que a aproximação da série foi adequada e forneceu estimativa satisfatória da taxa de secagem do produto.

Durante a modelagem e simulação dos processos de secagem de produtos agrícolas, diversos autores correlacionaram satisfatoriamente o coeficiente de difusão com os coeficientes dos modelos ajustados aos parâmetros de secagem, principalmente temperatura, umidade relativa e vazão do ar (Madamba et al., 1996; Afonso Júnior e Corrêa, 1999; Ozdemir e Devres, 1999; Azzouz et al., 2002, Mohapatra e Rao, 2005; Doymaz, 2005a; Doymaz, 2005b).

Considerando a importância do estudo teórico do processo de secagem dos produtos agrícolas tropicais e a limitação de informações teóricas a respeito dos fenômenos que ocorrem durante a secagem do feijão, este trabalho foi desenvolvido com os objetivos de estudar o fenômeno de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), desenvolver e ajustar diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais em função do teor de água, bem como determinar o coeficiente de difusão e a energia de ativação, acrescentando a contração volumétrica unitária dos grãos ao modelo da difusão líquida durante a secagem do produto sob diversas condições de secagem.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

As análises foram desenvolvidas no Laboratório de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas, pertencente ao Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), localizado na Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, MG.

Para a condução do experimento, foram utilizados grãos de feijão do grupo vermelho, cultivar vulgarmente denominado de “vermelhinho”, cultivados na safra de inverno do ano de 2003 no município de Cajuri-MG e colhidos manualmente, com teor de água de, aproximadamente, 0,92 (decimal b.s.).

Os teores de água do produto foram determinados por gravimetria, utilizando-se a estufa a $105 \pm 1^\circ\text{C}$, durante 24 horas, em três repetições (Brasil, 1992).

3.2.1 Curvas de secagem

A secagem do produto foi realizada em condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar de secagem.

As condições de temperatura e umidade relativa, apresentadas no Quadro 1, foram fornecidas por meio de uma unidade condicionadora de atmosfera, de fabricação da empresa Aminco.

QUADRO 1. Condições de temperatura e umidade relativa do ar utilizadas na secagem do feijão

Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Umidade relativa (%)		
35	30 ± 1	40 ± 1	60 ± 1
45	30 ± 1	40 ± 1	60 ± 1
55	23 ± 1	30 ± 1	40 ± 1

Foram colocadas no interior deste equipamento bandejas removíveis com fundo telado para permitir a passagem do ar através da massa do produto, contendo cada uma, inicialmente, 50 g de feijão, em duas repetições. O fluxo de ar foi monitorado com o auxílio de um anemômetro de lâminas rotativas e mantido constante em torno de $4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$. A temperatura e a umidade relativa do ar foram monitoradas por meio de psicrômetro instalado próximo às bandejas, contendo as amostras.

Durante o processo de secagem, as bandejas com as amostras foram pesadas periodicamente. A secagem do feijão prosseguiu até que o produto atingisse seu teor de água de equilíbrio com a condição do ar especificada. Entretanto, para determinação das curvas de secagem e ajuste dos modelos, foi estabelecido como ponto final da secagem, o teor de água

recomendado para armazenamento seguro do produto de, aproximadamente, 0,13 (decimal b.s.).

Para a determinação da razão de umidade do feijão, para as diferentes condições de secagem, utilizou-se a seguinte expressão:

$$RU = \frac{U^* - U_e^*}{U_i^* - U_e^*} \quad (8)$$

em que:

RU: razão de umidade do produto, adimensional;

U^* : teor de água do feijão, (decimal b.s.);

U_i^* : teor de água inicial, (decimal b.s.);

U_e^* : teor de água de equilíbrio, (decimal b.s.).

Aos dados experimentais de secagem do feijão, foram ajustados os modelos matemáticos freqüentemente utilizados para representação da secagem de produtos agrícolas (Afonso Júnior e Corrêa, 1999; Akpinar et al., 2003; Ertekin e Yaldiz, 2004; Lahsasni et al., 2004), cujas expressões estão apresentadas no Quadro 2.

Para o ajuste dos modelos, foram realizadas análises de regressão não linear, pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o programa computacional STATISTICA 5.0[®]. O grau de ajuste de cada modelo considerou a significância do coeficiente de regressão pelo teste t, adotando o nível de 1% de probabilidade, a magnitude do coeficiente de determinação (R^2), a magnitude do erro médio relativo (P) e do erro médio estimado (SE) e a verificação do comportamento da distribuição dos resíduos. O erro médio relativo e o erro médio estimado para cada um dos modelos foram calculados conforme as seguintes expressões:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (21)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (22)$$

em que:

Y: valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor calculado pelo modelo;

n: número de observações experimentais;

GLR: graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

QUADRO 2. Modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de secagem de produtos agrícolas

Designação do modelo	Modelo	
Wang e Singh	$RU = 1 + a t + b t^2$	(9)
Verna	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k_1 \cdot t)$	(10)
Thompson	$RU = \exp \left(\frac{-a \cdot (a^2 + 4 \cdot b \cdot t)^{0,5}}{2 \cdot b} \right)$	(11)
Page	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$	(12)
Newton	$RU = \exp(-k \cdot t)$	(13)
Midilli	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(14)
Logarítmico	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	(15)
Henderson e Pabis	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	(16)
Henderson e Pabis Modificado	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_o \cdot t) + c \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	(17)
Exponencial de Dois Termos	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot a \cdot t)$	(18)
Dois Termos	$RU = a \cdot \exp(-k_o \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	(19)
Aproximação da Difusão	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$	(20)

em que:

k, k_o, k_1 : constantes de secagem, s^{-1} ; e

a, b, c, n : coeficientes dos modelos.

3.2.2 Determinação do coeficiente de difusão

Para a determinação do coeficiente de difusão, procedeu-se à secagem do feijão descrita no item 3.2.1. Foram utilizadas as temperaturas de 25, 35, 45 e 55 °C e umidade relativa do ar variando entre 23 e 75%, totalizando quatorze combinações distintas. A secagem do feijão prosseguiu até que o produto atingisse o teor de água de equilíbrio com a condição do ar de secagem especificada.

O coeficiente de difusão foi obtido para duas condições, com e sem a contração volumétrica unitária dos grãos, por meio do ajuste aos dados experimentais de secagem do

modelo matemático da difusão líquida. Foi utilizada a solução analítica da equação para a forma geométrica esférica (Brooker et al., 1992), com aproximação de oito termos (Equação 7). O número de termos foi estabelecido quando a variação do coeficiente de difusão foi inferior a $0,1 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

O raio equivalente, utilizado no modelo da difusão líquida, é definido como o raio de uma esfera com o volume igual ao do grão, sendo determinado por meio da medição dos três eixos ortogonais (comprimento, largura e espessura), como proposto por Mohsenin (1986) e representado na Figura 1, em dez grãos ao longo do processo de secagem, com auxílio de um paquímetro digital. O volume de cada grão, considerado um esferóide, foi obtido utilizando-se a seguinte expressão:

$$V_g = \frac{\pi \cdot (a \cdot b \cdot c)}{6} \quad (23)$$

em que:

- a: maior eixo do grão, mm;
- b: eixo médio do grão, mm;
- c: menor eixo do grão, mm.

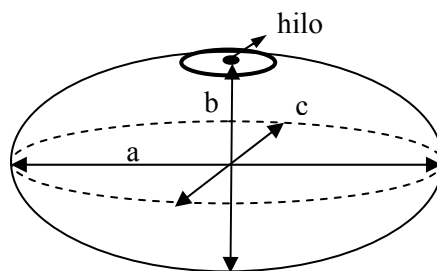


FIGURA 1. Desenho esquemático do grão de feijão com suas dimensões características.

Para verificar a influência da contração volumétrica no coeficiente de difusão, o experimento foi analisado segundo o esquema fatorial 14×2 (quatorze condições de ar e duas condições de contração), no delineamento inteiramente casualizado, com duas repetições. As médias foram comparadas, utilizando-se o teste de Tukey, adotando-se o nível de 5% de probabilidade.

3.2.2 Influência da temperatura

Para avaliar a influência da temperatura no coeficiente de difusão e nos coeficientes dos modelos ajustados à secagem do feijão, foi utilizada a equação de Arrhenius, descrita da seguinte forma:

$$K = K_0 \cdot \exp\left(\frac{E_a}{R \cdot T_a}\right) \quad (24)$$

em que:

K: parâmetro analisado;

K_0 : fator pré-exponencial;

E_a : energia de ativação, kJ mol^{-1} ;

R: constante universal dos gases, $8,314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$; e

T_a : temperatura absoluta, K.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Curvas de secagem

Na Figura 2, são apresentados os valores experimentais da secagem de feijão realizada em diversas condições de temperatura e umidade relativa do ar.

Analisando a Figura 2, verifica-se que o tempo necessário para o feijão atingir seu teor de água de, aproximadamente 0,13 (b.s.), foi de 25, 10 e 5,5 horas, para as temperaturas de 35, 45 e 55 °C, respectivamente. Com o aumento da temperatura do ar de secagem, ocorre maior taxa de remoção de água do produto, evidenciando o aumento da taxa de secagem, fato observado por diversos pesquisadores para inúmeros produtos agrícolas (Ozdemir e Devres, 1999; Basunia e Abe, 2001; Yaldiz, et al., 2001; Azzouz et al., 2002; Kaymak-Ertekin, 2002; Akpinar et al., 2003; Lahsasni et al., 2004; Babalis e Belessiotis, 2004; Mohapatra e Rao, 2005). Observou-se também, de forma inesperada, que a umidade relativa do ar de secagem apresentou efeito não significativo sobre a taxa de secagem. Este fato, possivelmente, pode ser atribuído ao elevado fluxo de ar responsável pela secagem dos grãos, resultante da câmara condicionadora da atmosfera. Resultados semelhantes foram observados por Madamba et al. (1996), que não verificaram influência da umidade relativa do ar para a faixa de 8 a 24%, durante a secagem de alho.

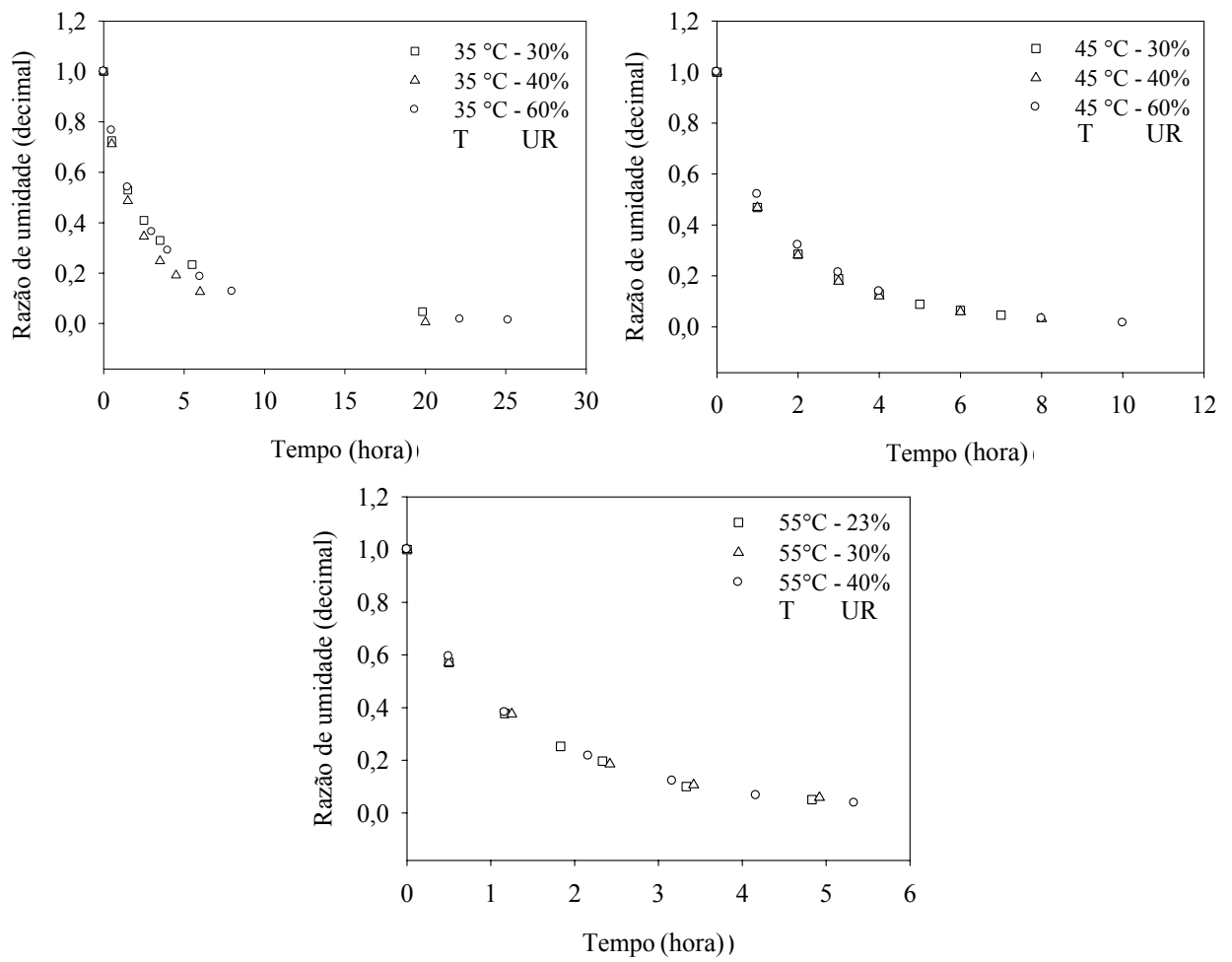


FIGURA 2. Valores experimentais da razão de umidade (decimal) e do tempo de secagem (horas) para nove combinações de temperatura (35 °C, 45 °C e 55 °C) e umidade relativa (23 a 60%) do ar durante a secagem do feijão.

No Quadro 3, são apresentados os valores dos coeficientes de determinação, erros médios relativo e estimado e a tendência da distribuição de resíduos para os doze modelos analisados, para a secagem do feijão, nas diversas condições de temperatura e umidade relativa do ar.

QUADRO 3. Coeficientes de determinação (R^2), erros médio estimado (SE, decimal) e relativo (P, %), e tendência de distribuição dos resíduos (Res), aleatória (A) ou tendenciosa (Td), para os doze modelos analisados, para a secagem do feijão nas diversas condições de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa (%) do ar

Temperatura de 35 $^{\circ}\text{C}$												
UR	30 \pm 1%				40 \pm 1%				60 \pm 1%			
Modelo	R^2	SE	P	Res	R^2	SE	P	Res	R^2	SE	P	Res
(9)	0,845	0,137	24,84	Td	0,840	0,143	63,15	Td	0,820	0,155	223,8	Td
(10)	0,998	0,018	10,02	Td	0,999	0,006	10,41	A	0,978	0,058	36,90	Td
(11)	0,999	0,007	2,57	Td	0,999	0,013	28,45	Td	0,999	0,008	11,31	Td
(12)	0,999	0,005	2,97	A	0,999	0,005	4,89	A	0,999	0,003	6,98	A
(13)	0,954	0,068	25,12	Td	0,979	0,047	23,72	Td	0,981	0,047	33,29	Td
(14)	0,999	0,002	0,45	A	0,999	0,005	3,24	A	0,999	0,002	0,51	A
(15)	0,543	0,263	123,4	Td	0,988	0,042	90,56	Td	0,990	0,039	40,85	Td
(16)	0,999	0,063	22,89	Td	0,999	0,043	21,11	Td	0,999	0,042	30,56	Td
(17)	0,968	0,002	0,22	A	0,986	0,004	0,54	A	0,987	0,007	10,41	Td
(18)	0,981	0,047	19,86	Td	0,996	0,023	15,59	Td	0,996	0,024	25,33	Td
(19)	0,998	0,021	9,97	A	0,999	0,007	10,41	A	0,999	0,008	16,42	A
(20)	0,998	0,018	10,01	A	0,999	0,006	10,41	A	0,999	0,007	16,46	A

Temperatura de 45 $^{\circ}\text{C}$												
UR	30 \pm 1%				40 \pm 1%				60 \pm 1%			
Modelo	R^2	SE	P	Res	R^2	SE	P	Res	R^2	SE	P	Res
(9)	0,913	0,103	57,86	Td	0,891	0,123	83,97	Td	0,475	0,267	1074	Td
(10)	0,999	0,002	1,36	Td	0,999	0,004	2,79	A	0,999	0,002	13,70	A
(11)	0,999	0,004	3,32	Td	0,999	0,004	3,15	Td	0,999	0,006	16,94	A
(12)	0,999	0,001	0,55	A	0,999	0,002	1,50	Td	0,999	0,002	11,66	A
(13)	0,983	0,042	30,37	Td	0,989	0,038	29,65	Td	0,994	0,026	35,93	Td
(14)	0,999	0,001	0,53	A	0,999	0,001	0,54	A	0,999	0,002	17,25	A
(15)	0,996	0,025	13,87	Td	0,996	0,027	18,09	Td	0,996	0,026	317,4	Td
(16)	0,999	0,044	28,66	Td	0,999	0,040	28,55	Td	0,999	0,027	35,04	Td
(17)	0,984	0,001	0,53	A	0,989	0,001	0,29	A	0,995	0,003	12,47	A
(18)	0,996	0,022	15,39	Td	0,998	0,018	15,66	Td	0,999	0,007	20,98	Td
(19)	0,999	0,002	1,36	A	0,999	0,004	2,79	A	0,999	0,002	13,70	A
(20)	0,999	0,002	1,36	A	0,999	0,004	2,79	A	0,999	0,002	13,70	A

QUADRO 3, Cont.

Temperatura de 55 °C													
UR		23±1%				30±1%				40±1%			
Modelo	R ²	SE	P	Res	R ²	SE	P	Res	R ²	SE	P	Res	
(9)	0,919	0,103	38,49	Td	0,918	0,114	40,69	Td	0,918	0,109	60,17	Td	
(10)	0,998	0,005	3,21	Td	0,933	0,119	19,16	Td	0,612	0,260	131,6	Td	
(11)	0,998	0,017	9,90	Td	0,997	0,020	7,52	A	0,985	0,046	25,20	Td	
(12)	0,999	0,011	5,81	A	0,999	0,014	4,20	A	0,999	0,007	5,13	A	
(13)	0,979	0,048	20,92	Td	0,977	0,055	25,24	Td	0,985	0,042	25,19	Td	
(14)	0,995	0,007	4,34	A	0,999	0,011	5,51	A	0,999	0,004	3,43	Td	
(15)	0,990	0,041	14,89	Td	0,990	0,046	13,28	Td	0,994	0,034	17,03	Td	
(16)	0,999	0,048	18,27	Td	0,980	0,056	21,96	Td	0,999	0,042	22,08	Td	
(17)	0,982	0,010	1,83	A	-	-	-	-	0,988	0,003	1,46	Td	
(18)	0,996	0,024	8,96	Td	0,994	0,031	12,56	Td	0,998	0,017	8,82	Td	
(19)	0,999	0,006	3,21	Td	0,999	0,010	4,46	Td	0,999	0,002	1,48	Td	
(20)	0,999	0,005	3,21	Td	0,999	0,008	4,46	Td	0,999	0,002	1,48	Td	

Nas Figuras 3 e 4, são apresentadas as tendências de distribuição de resíduos para o modelo de Page, em função dos valores estimados da razão de umidade do feijão. Os resíduos foram obtidos por meio da diferença entre os valores experimentais e os valores estimados pelo modelo.

Para as nove combinações de temperatura e umidade relativa utilizadas na secagem do feijão, observa-se que os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação (R²) superiores ou próximos a 0,98 (Quadro 3), indicando, de acordo com Madamba et al. (1996), uma representação satisfatória do processo de secagem, exceto para os modelos de Wang e Singh, Verna e Logaritmo. Para a maioria das condições analisadas, os modelos de Thompson, Page, Midilli, Henderson e Pabis modificado, Dois termos e Aproximação da Difusão apresentaram menores valores do erro médio estimado, e magnitudes do erro médio relativo inferior a 10%, indicando, de acordo com Mohapatra e Rao (2005), serem adequados para a descrição do processo. Verifica-se, ainda, que apenas os modelos de Page (Figuras 3 e 4) e Midilli apresentaram, para a maioria das condições de secagem, uma distribuição aleatória dos resíduos, resultando, assim, em melhores ajustes aos dados experimentais de secagem do feijão em camada fina.

Desta forma, a seleção e a recomendação do melhor modelo se fundamentaram na simplicidade e no número de coeficientes. Dentre os modelos que apresentaram melhor ajuste aos dados experimentais, o modelo de Page foi selecionado para representar o fenômeno de secagem do feijão, devido à sua simplicidade de aplicação e por ser tradicionalmente

recomendado para prever o processo de secagem de diversos produtos agrícolas (Soares, 1986; Ramos et al., 1994; Christ, 1996), inclusive sementes de feijão preto (Afonso Júnior e Corrêa, 1999).

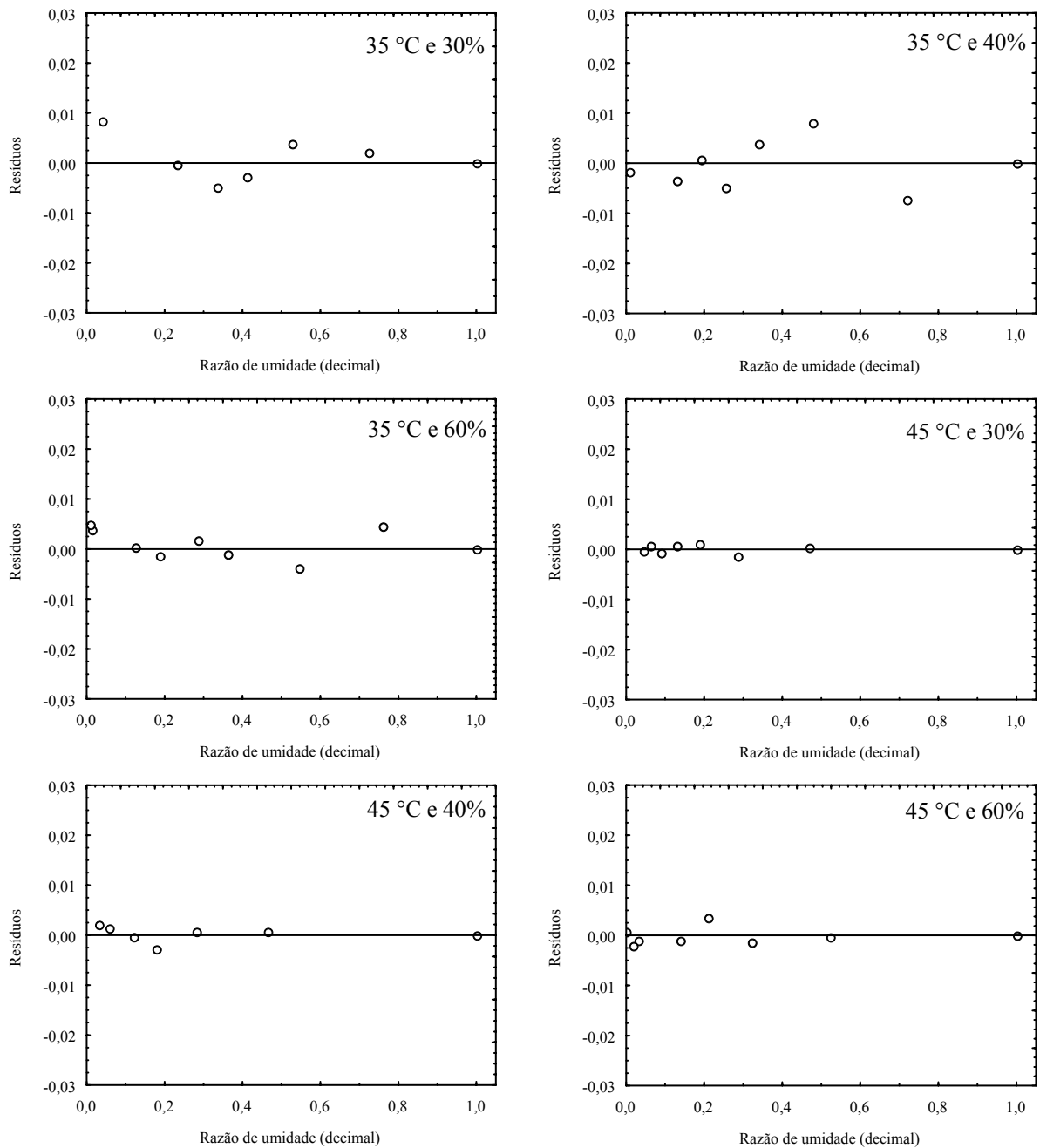


FIGURA 3. Tendência de distribuição dos resíduos para o modelo de Page, durante a secagem do feijão nas temperaturas de 35 e 45 °C e diversas umidades relativas do ar, em função dos valores estimados da razão de umidade

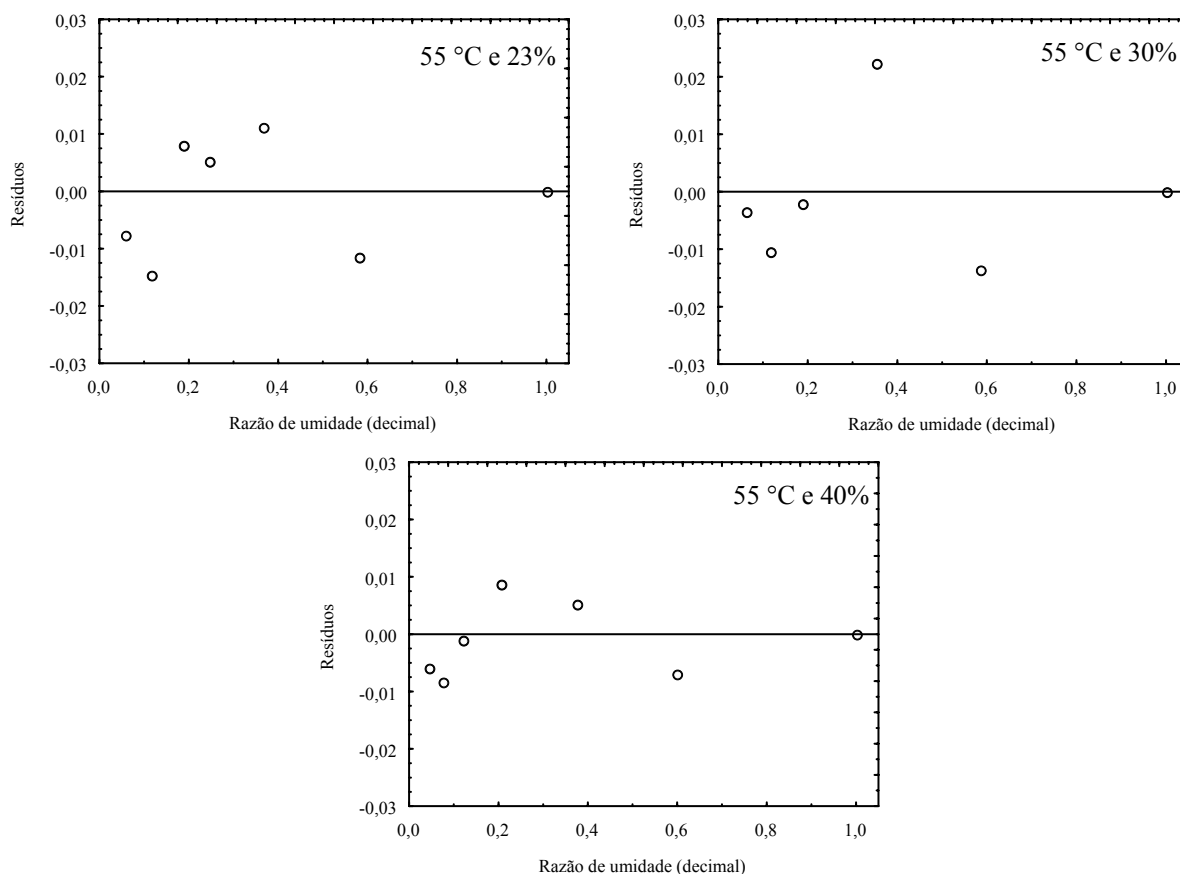


FIGURA 4. Tendência de distribuição dos resíduos para o modelo de Page, durante a secagem do feijão nas temperaturas de 55 °C e umidades relativas de 23, 30 e 40%, em função dos valores estimados da razão de umidade

No Quadro 4, são apresentados os coeficientes do modelo de Page, e na Figura 5 são apresentados os teores de água observados e estimados para a secagem do feijão para nove combinações de temperatura e umidade relativa do ar.

QUADRO 4. Coeficientes ajustados para o modelo de Page nas diversas condições de temperatura (T) e umidade relativa (UR) do ar para a secagem do feijão

T (°C)		35				45			
UR (%)		30±1	40±1	60±1	k médio	30±1	40±1	60±1	k médio
k**		0,00133	0,00207	0,00114	0,00151	0,00213	0,00182	0,00095	0,00163
n**		0,735	0,665	0,731		0,718	0,737	0,797	
T °C		55							
UR (%)		23±1	30±1	40±1	k médio				
k**		0,04	0,06	0,00162	0,00211	média geral n			
n**		0,732	0,719	0,768		0,7336			

**Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t.

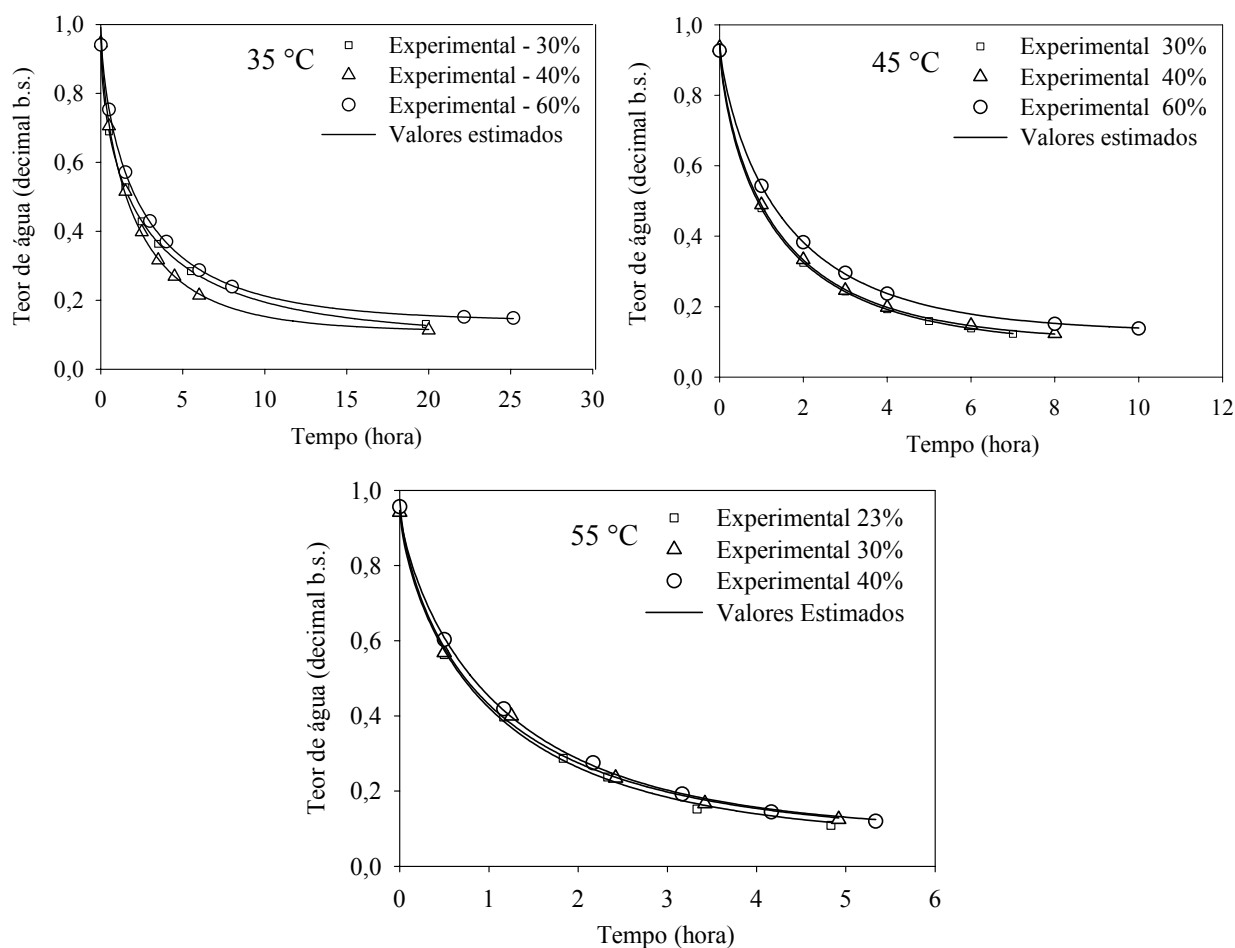


FIGURA 5. Teores de água experimentais e estimados pelo modelo de Page para a secagem do feijão em camada fina nas diversas condições de temperatura e umidade relativa do ar

No Quadro 4, observa-se que a magnitude da constante de secagem (k médio), que representa o efeito das condições externas de secagem, aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem. Segundo Madamba et al. (1996) e Babalis e Belessiotis (2004), a constante de secagem (k) pode ser utilizada como uma aproximação para caracterizar o efeito da temperatura e está relacionada à difusividade efetiva no processo de secagem no período decrescente e à difusão líquida que controla o processo. De um modo geral, para uma mesma temperatura, não se verifica qualquer tendência de variação da constante de secagem com a umidade relativa do ar, por isso foram calculadas as médias dos seus valores para cada temperatura testada.

Devido ao aumento do valor médio de k com a elevação da temperatura, esta dependência pode ser descrita por meio da equação de Arrhenius (Figura 6).

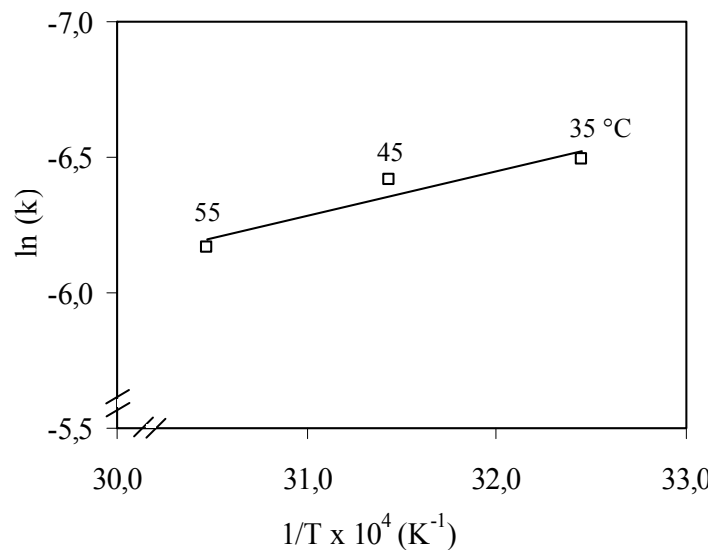


FIGURA 6. Representação de Arrhenius para a constante de secagem do modelo de Page, durante a secagem do feijão em camada fina.

A linearidade ilustrada na Figura 6 evidencia a uniformidade de variação da taxa de secagem dentro da faixa de temperatura estudada.

A Equação 25 apresenta os coeficientes da equação de Arrhenius para a constante de secagem do modelo de Page para a secagem do feijão em camada fina.

$$k = 0,4458 \cdot \exp\left(-\frac{14355,22}{R \cdot T_a}\right) \quad (25)$$

Observa-se, na Equação 25, que a energia de ativação para o processo de secagem do feijão foi de 14,355 kJ mol⁻¹ para a faixa de temperatura entre 35 e 55 °C. Termodinamicamente, a energia de ativação é definida como a facilidade com que as moléculas de água superam a barreira de energia durante a migração no interior do produto. Kayacier e Singh (2004) relatam que a energia de ativação diminui com a elevação do teor de água do produto. Nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação maior será a difusividade de água no produto. O valor da energia de ativação encontrado no presente trabalho está coerente com os observados em literatura especializada, cujas magnitudes para produtos de origem vegetal variam entre 12,7 e 110 kJ mol⁻¹ (Zogzas et al., 1996).

O coeficiente n do modelo de Page, que reflete a resistência interna do produto à secagem, não foi influenciado pelas condições de temperatura e umidade relativa do ar.

Desta forma, utilizando a equação de Arrhenius e o valor médio do coeficiente n para todas as condições do ar de secagem testadas, pode-se estimar o teor de água do produto por meio da seguinte expressão:

$$U_t^* = U_e^* + (U_i^* - U_e^*) \cdot \exp \left[- \left(0,4458 \cdot \exp \left(\frac{-1764,84}{(T + 273)} \right) \cdot t \right)^{0,7336} \right] \quad (26)$$

em que:

U_t^* : teor de água do produto no tempo t, (decimal b.s.);

t: tempo de secagem, s; e

T: temperatura do ar de secagem, °C.

A Figura 7 mostra a comparação entre os teores de água observados e os estimados pelo modelo de Page, expresso em função da equação de Arrhenius (Equação 26), para a secagem do feijão em camada fina, nas diversas condições de temperatura e umidade relativa do ar. Verifica-se que o modelo de Page, representado pelo modelo em função da temperatura de secagem, descreve adequadamente a cinética de secagem do feijão.

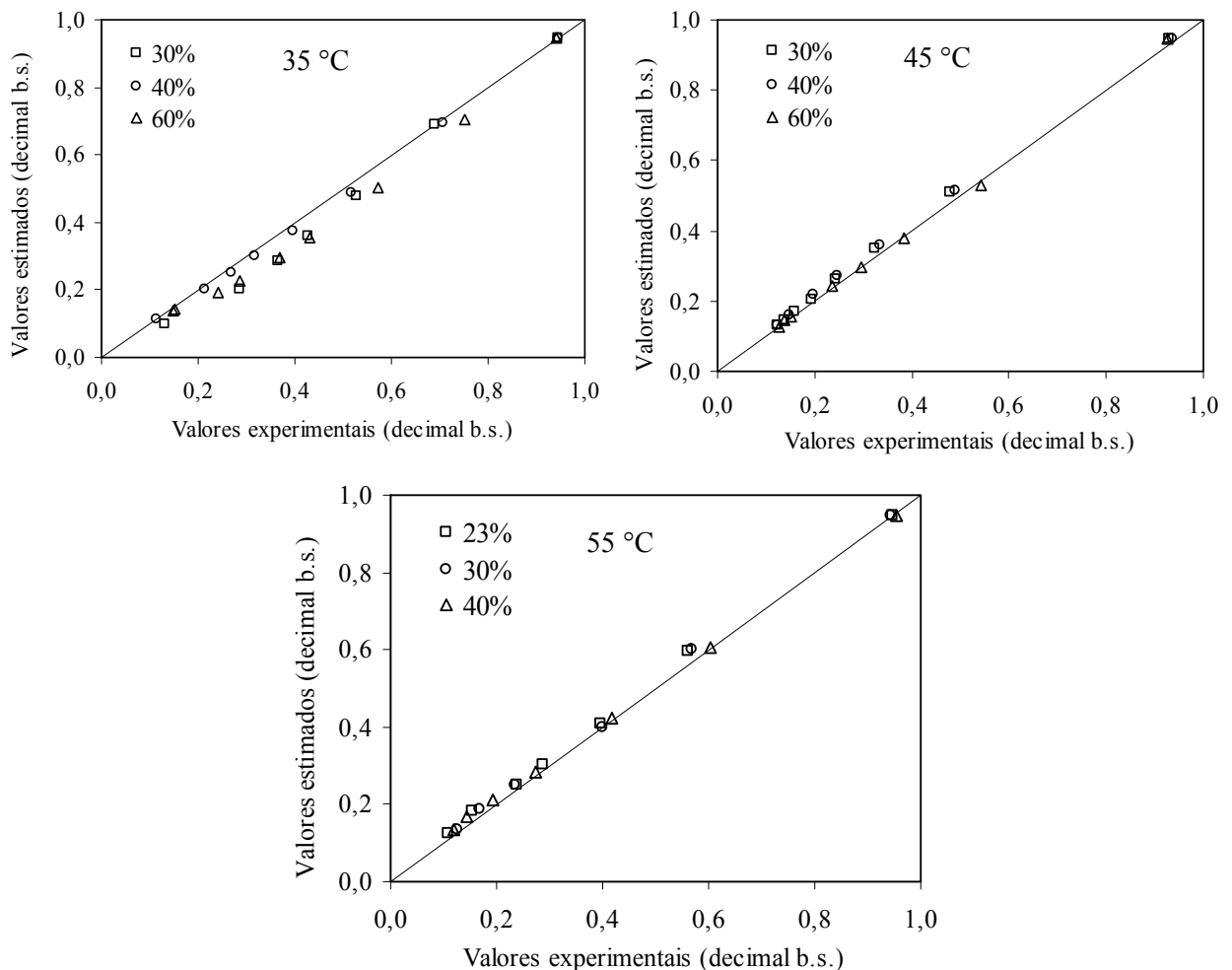


FIGURA 7. Teores de água experimentais e estimados pelo modelo de Page para a secagem do feijão em camada fina nas diversas condições de temperatura e umidade relativa do ar

3.3.2 Coeficiente de difusão

Os valores do raio equivalente dos grãos de feijão (R), utilizados no modelo da difusão líquida para a determinação do coeficiente de difusão durante a secagem em diversas condições de temperatura e umidade relativa do ar, são apresentados nos Quadros 5 e 6.

QUADRO 5. Valores do raio equivalente ($\times 10^{-3}$ m) e do teor de água (U^* , decimal b.s.) dos grãos de feijão, obtidos durante a secagem em diversas condições de ar, para as temperaturas de 25 e 35 °C

Temperatura 25 °C							
40±1%		60±1%		75±1%			
U^*	R (m)	U^*	R (m)	U^*	R (m)		
0,925	8,90	0,914	8,84	0,915	8,56		
0,678	8,20	0,683	8,35	0,695	8,10		
0,554	8,04	0,569	8,15	0,564	7,84		
0,471	7,95	0,486	8,01	0,455	7,62		
0,412	7,94	0,423	7,95	0,382	7,55		
0,325	7,92	0,336	7,91	0,343	7,53		
0,273	7,92	0,287	7,92	0,317	7,50		
0,237	7,85	0,193	7,92	0,241	7,49		
0,159	7,86	0,184	7,91	0,234	7,45		
0,155	7,84	0,178	7,85	0,230	7,46		
0,147	7,83	0,179	7,89	0,230	7,47		
0,147	7,83	0,172	7,84	0,225	7,47		
-	-	-	-	0,223	7,44		
Temperatura 35 °C							
30±1%		50±1%		60±1%		75±1%	
U^*	R (m)	U^*	R (m)	U^*	R (m)	U^*	R (m)
0,915	8,96	0,948	9,02	0,941	8,85	0,915	8,84
0,690	8,46	0,730	8,46	0,753	8,30	0,617	8,12
0,528	8,25	0,546	8,17	0,572	8,05	0,499	8,00
0,429	8,15	0,439	7,97	0,430	7,92	0,427	7,76
0,364	8,05	0,321	7,92	0,370	7,91	0,364	7,81
0,285	8,06	0,250	7,86	0,287	7,88	0,283	7,74
0,131	7,96	0,216	7,85	0,240	7,83	0,246	7,71
0,122	7,91	0,137	7,81	0,152	7,80	0,225	7,68
0,101	7,88	0,133	7,77	0,149	7,80	0,202	7,71
0,100	7,87	0,128	7,74	0,144	7,78	0,203	7,82
0,095	7,92	-	-	-	-	0,207	7,72
-	-	-	-	-	-	0,203	7,71

QUADRO 6. Valores do raio equivalente ($\times 10^{-3}$ m) e do teor de água (U^* , decimal b.s.) dos grãos de feijão, obtidos durante a secagem em diversas condições de ar, para as temperaturas de 45 e 55 °C

Temperatura 45 °C							
30±1%		40±1%		60±1%			
U^*	R (m)	U^*	R (m)	U^*	R (m)		
0,929	8,79	0,935	8,97	0,927	8,86		
0,479	8,22	0,489	8,32	0,543	8,23		
0,325	8,14	0,333	8,23	0,382	8,12		
0,243	8,11	0,246	8,22	0,296	8,09		
0,193	8,13	0,198	8,21	0,236	8,07		
0,159	8,14	0,146	8,16	0,151	8,05		
0,138	8,11	0,123	8,13	0,137	8,05		
0,123	8,06	0,113	8,12	0,126	8,02		
0,105	8,01	0,099	8,06	0,125	8,03		
0,086	7,98	0,097	8,07	-	-		
0,087	7,99	0,096	8,04	-	-		
0,086	7,99	-	-	-	-		
Temperatura 55 °C							
23±1%		30±1%		40±1%		50±1%	
U^*	R (m)	U^*	R (m)	U^*	R (m)	U^*	R (m)
0,947	8,96	0,942	8,47	0,956	8,87	0,940	8,84
0,569	8,34	0,569	8,29	0,603	8,20	0,648	8,30
0,398	8,16	0,400	8,14	0,419	8,06	0,386	7,93
0,287	8,16	0,235	8,11	0,275	8,02	0,276	7,83
0,238	8,17	0,167	8,14	0,192	7,98	0,192	7,76
0,153	8,19	0,125	8,09	0,145	7,96	0,152	7,74
0,109	8,13	0,079	7,94	0,120	7,95	0,135	7,70
0,089	8,08	0,078	7,94	0,110	7,96	0,100	7,65
0,066	7,99	0,077	7,93	0,097	7,92	0,100	7,65
0,065	7,98	0,076	7,91	0,092	7,89	-	-
-	-	0,072	7,93	0,087	7,85	-	-

No Quadro 7, são apresentados os valores médios do coeficiente de difusão obtidos durante a secagem do feijão nas diferentes condições de temperatura e umidade relativa do ar, considerando a contração volumétrica unitária dos grãos (raio equivalente variável), utilizando o raio equivalente inicial dos grãos e mantendo-o constante ao longo da secagem.

QUADRO 7. Coeficiente de difusão obtido durante a secagem do feijão nas diversas condições, considerando a contração volumétrica dos grãos (R variável), utilizando o raio equivalente inicial dos grãos (R constante) e mantendo-o constante ao longo da secagem

Condição de secagem		Coeficiente de difusão x 10 ⁻¹⁰ (m ² s ⁻¹)	
Temperatura (°C)	Umidade relativa (%)	R variável	R constante
25	40±1	2,65 b	3,32 a
	60±1	2,81 b	3,42 a
	75±1	2,21 b	2,77 a
35	30±1	3,28 b	3,97 a
	50±1	3,16 b	4,03 a
	60±1	3,22 b	4,00 a
	75±1	3,79 b	4,81 a
45	30±1	7,08 b	8,26 a
	40±1	7,43 b	8,82 a
	60±1	6,24 b	7,44 a
55	23±1	9,08 b	10,89 a
	30±1	8,66 b	9,34 a
	40±1	8,51 b	10,38 a
	50±1	5,72 b	6,43 a

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey (Diferença mínima significativa: 0,36 x 10⁻¹⁰; CV: 3,03%).

Analisando os resultados, verifica-se que, para todas as condições de secagem, o coeficiente de difusão para o feijão, considerando a contração volumétrica dos grãos, foi significativamente superior aos valores obtidos a partir do raio equivalente inicial dos grãos e mantendo-o constante, ou seja, desprezando a redução de volume do produto ao longo da secagem. Brooker et al.(1992) relatam que a maioria dos modelos empregados para representar a movimentação de água nos produtos agrícolas foi desenvolvida negligenciando a importância da contração volumétrica do produto. Ramos et al. (2005) também ressaltam que as modificações volumétricas devem ser incluídas nos modelos para uma completa descrição e análise deste processo. Desta forma, os resultados observados no presente trabalho

comprovam a importância e a necessidade da introdução desta variável no modelo de difusão líquida para uma melhor estimativa do coeficiente de difusão.

Durante a secagem dos grãos de feijão, os coeficientes de difusão apresentaram magnitudes entre $2,21 \times 10^{-10}$ e $9,08 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, considerando a contração volumétrica dos grãos e entre $2,77 \times 10^{-10}$ e $10,89 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, utilizando o raio equivalente inicial dos grãos, para a faixa de temperatura de 25 a 55 °C. Os valores do coeficiente de difusão calculados para o feijão estão coerentes com os relatados na literatura para secagem de produtos agrícolas que, de acordo com Madamba et al. (1996), apresentam-se na ordem de 10^{-9} a $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

De um modo geral, para uma mesma temperatura, não se verifica qualquer tendência de variação do coeficiente de difusão com a umidade relativa do ar. Entretanto, com a elevação da temperatura, os valores do coeficiente de difusão aumentaram sensivelmente, corroborando os resultados relatados por Doymaz (2005b) para quiabo, que variaram entre $4,27 \times 10^{-10}$ a $1,30 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para a faixa de temperatura entre 50 e 70 °C.

A dependência do coeficiente de difusão com relação à temperatura do ar de secagem tem sido satisfatoriamente descrita pela equação de Arrhenius (Ramesh, 2003; Doymaz, 2005a; Doymaz, 2005b).

A Figura 8 mostra os valores de $\ln(D)$ em função do inverso da temperatura absoluta ($1/T_a$).

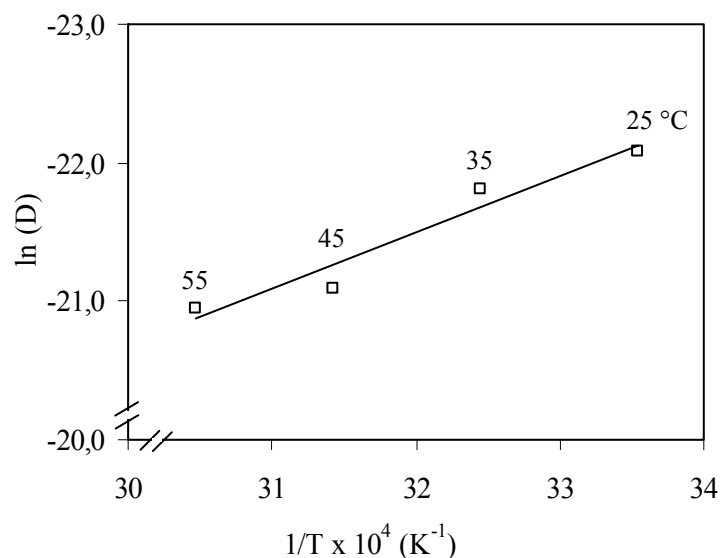


FIGURA 8. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão, em função da temperatura do ar de secagem, obtido considerando a contração volumétrica dos grãos durante a secagem do feijão

A inclinação da curva da representação de Arrhenius fornece a relação E_a/R , enquanto a sua interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de D_0 . A Equação (27) apresenta os

coeficientes da equação ajustada para o coeficiente de difusão do feijão, calculados de acordo com a Equação (24).

$$k = 1,997 \cdot 10^{-4} \cdot \exp\left(-\frac{32986,62}{R \cdot T_a}\right) \quad (27)$$

Como pode ser observado na Equação 27, a energia de ativação para a difusão líquida do feijão foi de, aproximadamente 33,0 kJ mol⁻¹. Nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação maior será a difusividade de água no produto. Kayacier e Singh (2004) relatam que a energia de ativação diminui com a elevação do teor de água do produto. O valor da energia de ativação encontrado neste trabalho está coerente com os valores de 39,47 e 35,43 kJ mol⁻¹ observados para o feijão verde por Senadeera et al. (2003) e Doymaz (2005a), respectivamente. Na literatura especializada, são encontrados os seguintes valores da energia de ativação para diversos produtos agrícolas: para arroz cozido, 36,4 kJ mol⁻¹ (Ramesh, 2003); soja, 28,8 kJ mol⁻¹ (Kitic e Viollaz, 1984); ervilhas verdes, 28,40 kJ mol⁻¹ (Simal et al., 1996); cenoura, 28,36 kJ mol⁻¹ (Doymaz 2004); cebolinha, de 29,05 a 42,05 kJ mol⁻¹ (Park et al., 1996); champignon em conserva, de 23,89 a 31,45 kJ mol⁻¹ (Bróvia et al., 1997); e para milho da espécie *Zea mays indentata*, 29,56 kJ mol⁻¹ (Doymaz e Pala, 2003). Zogzas et al. (1996) ressaltam que a energia de ativação para produtos agrícolas varia entre 12,7 a 110 kJ mol⁻¹.

3.4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- o tempo necessário para a secagem do feijão até o teor de água de 0,13 (decimal b.s.) foi de 25, 10 e 5,5 horas, para as temperaturas de 35, 45 e 55 °C, respectivamente;

- a umidade relativa do ar não influenciou, significativamente, na taxa de secagem do feijão nas diversas condições analisadas;

- baseando-se em parâmetros estatísticos, os modelos de Page e Midilli, dentre aqueles ajustados, são os que melhor representam o processo de secagem do feijão, tendo sido o tradicional modelo de Page selecionado para descrever a cinética de secagem do feijão em camada fina;

- a relação entre a constante de secagem “k” do modelo de Page e a temperatura do ar pode ser descrita pela equação de Arrhenius, apresentando uma energia de ativação de 14,355 kJ mol⁻¹;

- a contração volumétrica dos grãos introduzida no modelo da difusão líquida melhora a estimativa do coeficiente de difusão durante a secagem do feijão;

- o coeficiente de difusão aumenta com a elevação da temperatura, apresentando valores entre $2,21 \times 10^{-10}$ e $9,08 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, considerando a contração volumétrica dos grãos, durante a secagem do feijão; e

- a relação do coeficiente de difusão com a temperatura de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão líquida do feijão de 32,986 kJ mol⁻¹.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE EMBEBIÇÃO DOS GRÃOS DE FEIJÃO

4.1. INTRODUÇÃO

A reidratação de materiais é um processo complexo que tem como objetivo reconstituir as características originais do produto, quando submetido ao contato com uma fase líquida (Bilbao-Sáinz et al., 2005).

Os processos de secagem seguidos de reidratação podem induzir alterações na estrutura e na composição química dos alimentos. Assim, a reidratação pode ser considerada uma forma de avaliar as injúrias causadas aos alimentos durante as etapas do processamento, principalmente, durante a secagem (Lewicki, 1998).

Durante a embebição, a água é difundida para o interior do produto, promovendo o aumento do seu volume. Esta expansão volumétrica pode ocorrer diferencialmente nas direções radial e axial dos grãos (Bayram et al., 2004b), sendo influenciada, principalmente, pela temperatura da solução de embebição.

Bayram et al. (2004b), analisando a variação das dimensões de grãos de soja durante a embebição em diferentes temperaturas, verificaram aumento do volume do produto de 129,6; 130,1 e 146,3 % para as temperaturas de 30, 50 e 70°C, respectivamente.

O efeito da temperatura durante a embebição tem sido estudado para diversos produtos agrícolas: milho (Bhattacharya, 1995; Verma e Prasad, 1999), feijão Kidney (Abu-Ghnam e Mckenna, 1997), soja (Pan e Tangratanavalee, 2003; Bayram et al., 2004b), trigo (Bayram et

al., 2004a), arroz (Belo et al., 2004) e sementes de amaranth (Resio et al., 2003; Resio et al., 2005).

A absorção de água pelos produtos agrícolas submetidos ao processo de embebição, geralmente, aumenta com a elevação da temperatura e do tempo de embebição (Bhattacharya 1995; Pan e Tangratanavalee, 2003; Resio et al., 2003; Resio et al., 2005; Bello et al., 2004; Bayram et al., 2004b).

O movimento de água no sólido pode ser explicado por meio de distintos mecanismos. Vários autores têm proposto que o principal mecanismo de transporte de água seja a difusão líquida (Fortes e Okos, 1980a; Geankoplis, 1983). A difusão ocorre nos sólidos de estrutura fina e nos capilares ou poros e nos pequenos orifícios cheios de vapor. Contudo, a teoria de difusão não considera o encolhimento, o endurecimento da casca (hard skin) e as isotermas de sorção (Barbosa-Cánovas e Veja-Mercado, 2000).

A modelagem matemática é essencial para prever e simular o comportamento dos materiais submetidos a determinado processo. Na literatura, existem diversos modelos matemáticos que expressam o fenômeno de hidratação de produtos agrícolas, e a maioria destes modelos baseia-se nas leis de difusão, envolvendo numerosas funções e parâmetros que, dificilmente, representam a absorção da água de maneira simples (Abu-Ghnam e Mckenna, 1997). Desta forma, Peleg (1988) propôs um modelo empírico na tentativa de simplificar a descrição da absorção de água em grãos e cereais. Este modelo tem sido utilizado, satisfatoriamente, por diversos pesquisadores para a representação deste fenômeno (Abu-Ghnam e Mckenna, 1997; Turhan et al., 2002; Pan e Tangratanavalee, 2003).

Diante o exposto, desenvolveu-se este trabalho com o objetivo de determinar a expansão volumétrica dos grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e avaliar suas curvas de hidratação, ajustando o modelo de Peleg aos valores experimentais, bem como obter o coeficiente de difusão e a energia de ativação durante a embebição do produto em diversas temperaturas.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), pertencente à Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, MG.

Para a condução do experimento, foram utilizados grãos de feijão do grupo vermelho, cultivar vulgarmente denominado de "vermelhinho", cultivados na safra de inverno do ano de

2004 no município de Cajuri-MG e colhidos manualmente, com teor de água de, aproximadamente, 0,25 (decimal b.s.) e secos até o teor de água de 0,18 (decimal b.s.). O teor de água do produto foi determinado pelo método da estufa, 105 ± 1 °C, durante 24 horas, em três repetições (Brasil, 1992).

O feijão foi submetido à embebição em água destilada nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C. Foram utilizados beakers (capacidade de 100 mL) contendo 80 mL de água destilada juntamente com 20 gramas de produto em cada amostra, perfazendo uma relação em massa de 4:1. Para acompanhamento da absorção de água, as amostras foram pesadas periodicamente, retiradas dos beakers e colocadas sobre papel de filtro para escoamento da água superficial durante, aproximadamente, dois minutos. A absorção de água pelo feijão prosseguiu até que o produto atingisse seu teor de água de equilíbrio.

4.2.1 Forma e tamanho

A forma e o tamanho dos grãos de feijão, considerados esferóides, foram analisados pela esfericidade, circularidades e volume, a partir das medidas, em dez grãos, das dimensões características, eixos ortogonais, obtidas por meio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm.

A esfericidade dos grãos de feijão foi determinada de acordo com a seguinte expressão descrita por Mohsenin (1986):

$$E_s = \left[\frac{(a \cdot b \cdot c)^{1/3}}{a} \right] \cdot 100 \quad (1)$$

em que:

E_s : esfericidade, %;

a: maior eixo do grão, mm;

b: eixo médio do grão, mm; e

c: menor eixo do grão, mm.

As circularidades do feijão foram determinadas para cada uma das três posições de projeção dos grãos apresentadas na Figura 1, e calculadas pela seguinte expressão (Mohsenin, 1986):

$$C_r = \frac{d_i}{d_c} \cdot 100 \quad (2)$$

em que:

C_r : circularidade, %;

d_i : diâmetro do maior círculo inscrito, mm;

d_c : diâmetro do menor círculo circunscrito, mm.

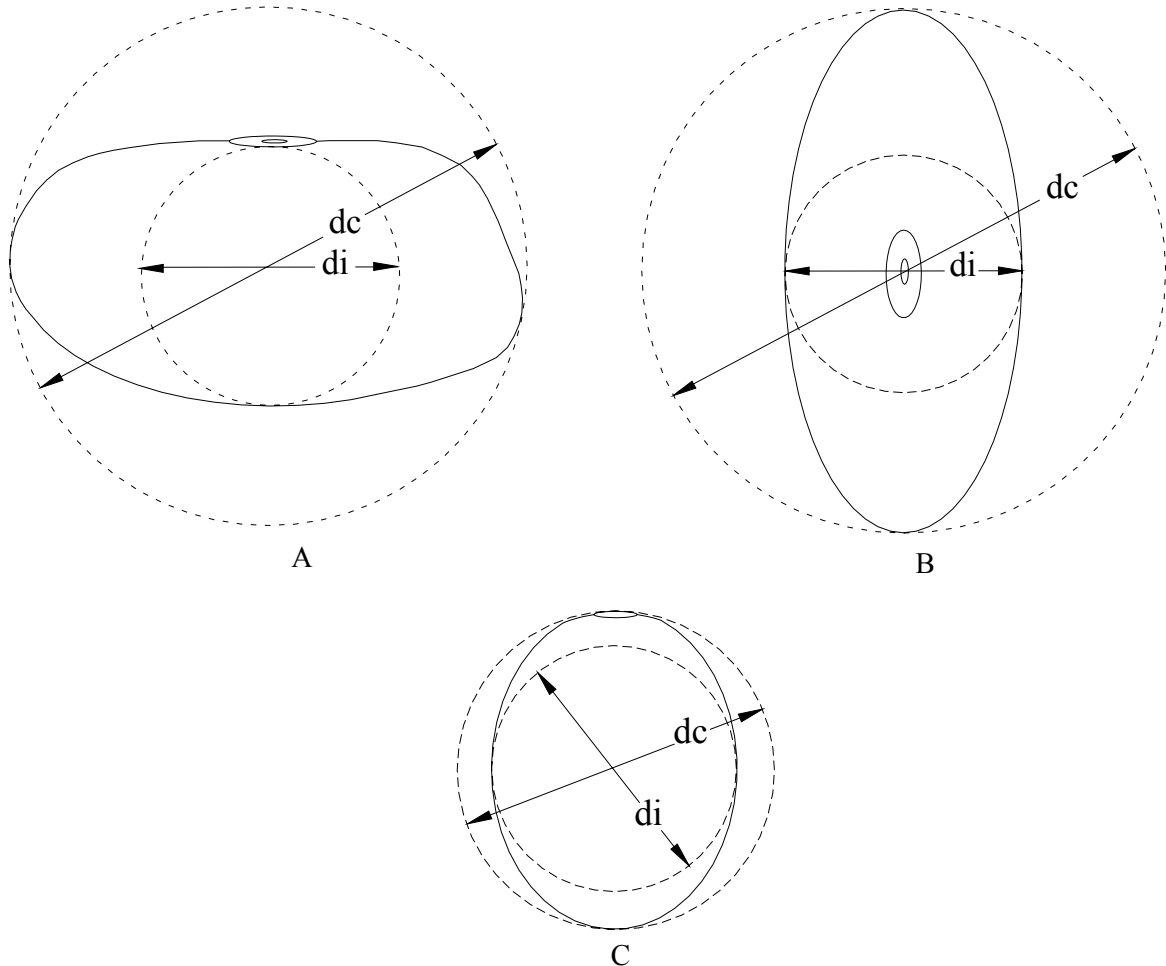


FIGURA 1. Representação dos grãos de feijão nas três posições de projeção, (A) maior eixo, C_{r1} ; (B) eixo médio, C_{r2} ; (C) menor eixo, C_{r3} .

4.2.2 Expansão volumétrica

A expansão volumétrica dos grãos durante a embebição do produto foi determinada pela relação entre o volume dos grãos para cada teor de água e o volume inicial.

$$\lambda = \frac{V_g}{V_{go}} \quad (3)$$

em que:

λ : expansão volumétrica dos grãos, decimal;

V_g : volume dos grãos para cada teor de água, m^3 ;

V_{go} : volume inicial dos grãos, m^3 .

O volume de cada grão foi obtido por meio da medição dos três eixos ortogonais (comprimento, largura e espessura), considerando o grão um esferóide (Figura 1), como proposto por Mohsenin (1986). As dimensões características (a, b e c) foram determinadas, utilizando-se um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, em dez grãos, durante o processo de embebição, de acordo com a seguinte expressão:

$$V_g = \frac{\pi \cdot (a \cdot b \cdot c)}{6} \quad (4)$$

Devido à ausência de modelos que expressem a expansão volumétrica, aos dados experimentais foram ajustados os modelos matemáticos freqüentemente utilizados para representação da contração volumétrica de produtos agrícolas, cujas expressões são apresentadas no Quadro 1.

QUADRO 1. Modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais da expansão volumétrica do feijão

Referência do modelo	Modelo	
Bala e Woods (1984)	$\lambda = c_1 \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-c_2 \cdot (U^* - U_0^*) \right] \right\}$	(5)
Lang e Sokhansanj (1993)	$\lambda = c_1 + \beta \cdot (U^* - U_0^*)$	(6)
Rahman (1995)	$\lambda = 1 + \beta \cdot (U^* - U_0^*)$	(7)
Corrêa et al. (2004a)	$\lambda = 1 / \left(c_1 + c_2 \cdot \exp(U^*) \right)$	(8)
Linear	$\lambda = c_1 + c_2 \cdot U^*$	(9)
Exponencial	$\lambda = c_1 \cdot \exp(b \cdot U^*)$	(10)

em que

γ : expansão volumétrica, decimal;

U^* : teor de água do produto, decimal (b.s.);

U_0^* : teor de água inicial do produto, decimal (b.s.);

c_1, c_2 : parâmetros que dependem do produto;

β : coeficiente de alteração volumétrica, adimensional.

Para o ajuste dos modelos matemáticos, foi realizada análise de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o programa computacional STATISTICA 5.0[®]. O grau de ajuste de cada modelo foi determinado, considerando a significância do coeficiente de regressão pelo teste t, adotando o nível de 5% de probabilidade, a magnitude do coeficiente de determinação (R^2 ou r^2 para regressão linear simples), a magnitude do erro médio relativo (P) e do erro médio estimado (SE) e a verificação do comportamento aleatório da distribuição dos resíduos. Os erros médios relativo e estimado, para cada um dos modelos, foram calculados conforme as seguintes expressões:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (11)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (12)$$

em que:

Y: valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor calculado pelo modelo;

n: número de observações experimentais;

GLR: graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

4.2.3 Modelagem matemática da embebição

Aos dados experimentais da embebição do feijão foi ajustado o tradicional modelo de Peleg, recomendado para a descrição da hidratação de produtos de origem vegetal, de acordo com a seguinte expressão:

$$U_t^* = \frac{(U_0^* + t)}{(C_1 + C_2 \cdot t)} \quad (13)$$

em que:

U_t^* : teor de água no tempo t, (decimal b.s.);

U_0^* : teor de água inicial, (decimal b.s.);

t: tempo de embebição, (h);

C_1 e C_2 : constantes de Peleg.

4.2.4 Coeficiente de difusão

O coeficiente de difusão foi determinado por meio de uma solução analítica para a segunda lei de Fick, considerando a forma geométrica esférica (Brooker et al., 1992), com aproximação de oito termos, utilizando a expansão volumétrica dos grãos e desprezando-se este fenômeno.

O coeficiente de difusão foi obtido para duas condições, com e sem a expansão volumétrica dos grãos, por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida aos dados experimentais de embebição. Foi utilizada a solução analítica da equação para a forma geométrica esférica (Brooker et al., 1992), indicada na Equação 14, com aproximação de oito termos, sendo estabelecida quando a variação do coeficiente de difusão fosse inferior a $0,1 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

$$RU = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-\frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot D \cdot t}{9} \cdot \left(\frac{3}{r} \right)^2 \right] \quad (14)$$

em que:

D: coeficiente de difusão de líquido, $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$;

t: tempo de embebição, s;

r: raio equivalente, m; e

n: número de termos.

O raio equivalente é definido como o raio de uma esfera com o volume igual ao do grão, sendo determinado por meio da medição dos três eixos ortogonais, como descrito no item 4.2.2.

Para verificar a influência da expansão volumétrica no coeficiente de difusão, o experimento foi analisado segundo o esquema fatorial 4×2 (quatro temperaturas e duas condições de expansão), no delineamento inteiramente casualizado com três repetições. As médias foram comparadas, utilizando-se o teste de Tukey, adotando-se o nível de 5% de probabilidade.

A influência da temperatura na variação do coeficiente de difusão foi avaliada por meio da equação de Arrhenius, descrita da seguinte forma:

$$D = D_0 \cdot \exp \left(\frac{E_a}{R \cdot T_a} \right) \quad (15)$$

em que

D_0 : fator pré-exponencial;

E_a : energia de ativação, kJ mol^{-1} ;

R: constante universal dos gases, $8,314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$;

T_a : temperatura absoluta, K.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Forma e tamanho

Nos Quadros 2 e 3, são apresentadas as variações dos eixos ortogonais dos grãos de feijão, da circularidade e da esfericidade, em função do teor de água, durante a embebição em diferentes temperaturas.

De acordo com os Quadros 2 e 3, verifica-se que os grãos de feijão se expandem diferencialmente nas direções radial e axial, apresentando variações desuniformes das suas dimensões características. A maior expansão foi verificada para a menor dimensão característica (c) relativa à espessura dos cotilédones, podendo chegar próximo a 45%. Resultados semelhantes foram observados por Bayram et al. (2004b), que, analisando a expansão volumétrica da soja durante a embebição em diferentes temperaturas, comprovaram aumento heterogêneo das dimensões dos três eixos ortogonais dos grãos.

Os valores da esfericidade e da circularidade referentes às três posições dos grãos apresentaram oscilações ao longo do processo de embebição nas diferentes temperaturas. Assim, a forma do feijão foi alterada irregularmente durante a embebição, não tendo sido possível identificar uma única tendência para todas as variáveis analisadas.

QUADRO 2. Dimensões médias dos eixos (a, b e c) ortogonais dos grãos de feijão, índices de expansão (a/a_0 , b/b_0 e c/c_0), esfericidade (E_s) e as circularidades, segundo o maior eixo (C_{r1}), eixo médio (C_{r2}) e menor eixo (C_{r3}), durante a embebição do feijão, nas temperaturas de 20 e 30 °C

Temperatura 20 °C										
Teor de água (decimal b.s.)	Eixos ortogonais (mm)			a/a_0 (%)	b/b_0 (%)	c/c_0 (%)	C_{r1} (%)	C_{r2} (%)	C_{r3} (%)	E_s (%)
	a	b	c							
0,186	10,89	7,07	5,07	100,0	100,0	100,0	65,0	46,5	71,6	67,1
0,724	11,45	8,08	5,81	105,2	114,3	114,8	70,6	50,8	71,9	71,0
0,999	12,75	8,34	6,61	117,0	118,0	130,5	65,5	51,9	79,2	69,8
1,112	13,25	8,43	6,46	121,6	119,1	127,5	63,6	48,8	76,7	67,7
1,185	13,58	8,54	6,39	124,7	120,7	126,1	62,9	47,0	74,8	66,6
1,229	13,71	8,60	6,39	125,9	121,5	126,1	62,7	46,6	74,3	66,4
1,271	13,78	8,65	6,41	126,5	122,2	126,5	62,7	46,5	74,1	66,3
1,297	13,82	8,67	6,44	126,9	122,6	127,1	62,8	46,6	74,2	66,4
1,338	13,93	8,83	6,61	127,9	124,9	130,5	63,4	47,4	74,8	67,0
1,360	13,96	8,89	6,66	128,2	125,6	131,6	63,7	47,7	75,0	67,2
1,380	14,04	8,85	6,66	128,9	125,1	131,4	63,0	47,4	75,2	66,9
1,387	14,06	8,85	6,70	129,1	125,0	132,3	62,9	47,6	75,7	66,9
1,417	14,13	8,96	6,75	129,8	126,7	133,3	63,4	47,8	75,3	67,1
1,426	14,22	8,90	6,77	130,6	125,8	133,6	62,6	47,6	76,1	66,8
1,445	14,23	8,99	6,78	130,6	127,1	133,9	63,2	47,7	75,4	67,0
Temperatura 30 °C										
Teor de água (decimal b.s.)	Eixos ortogonais (mm)			a/a_0 (%)	b/b_0 (%)	c/c_0 (%)	C_{r1} (%)	C_{r2} (%)	C_{r3} (%)	E_s (%)
	a	b	c							
0,186	10,52	6,83	4,70	100,0	100,0	100,0	64,9	44,6	68,8	66,2
0,787	11,69	8,08	5,72	111,1	118,4	121,8	69,1	48,9	70,8	69,7
1,085	12,61	8,04	6,24	119,9	117,7	132,9	63,7	49,5	77,7	68,1
1,179	13,28	8,26	6,10	126,2	120,9	129,7	62,2	45,9	73,8	65,8
1,248	13,38	8,37	6,18	127,2	122,6	131,5	62,6	46,2	73,8	66,1
1,285	13,47	8,41	6,31	128,0	123,2	134,3	62,5	46,8	75,0	66,4
1,329	13,50	8,51	6,41	128,3	124,6	136,4	63,0	47,5	75,4	66,9
1,339	13,53	8,49	6,43	128,6	124,4	136,8	62,8	47,5	75,7	66,8
1,382	13,58	8,50	6,47	129,0	124,5	137,6	62,6	47,6	76,1	66,8
1,408	13,63	8,56	6,49	129,5	125,3	138,2	62,8	47,6	75,9	66,9
1,397	13,64	8,54	6,50	129,6	125,1	138,4	62,6	47,7	76,1	66,8
1,411	13,67	8,59	6,54	129,9	125,8	139,3	62,8	47,9	76,2	67,0
1,424	13,85	8,68	6,61	131,6	127,2	140,6	62,7	47,7	76,1	66,9
1,439	13,88	8,66	6,68	131,9	126,9	142,1	62,4	48,1	77,1	67,0
1,451	14,00	8,63	6,75	133,1	126,4	143,8	61,6	48,2	78,3	66,7

QUADRO 3. Dimensões médias dos eixos (a, b e c) ortogonais dos grãos de feijão, índices de expansão (a/a_0 , b/b_0 e c/c_0), esfericidade (E_s) e as circularidades, segundo o maior eixo (C_{r1}), eixo médio (C_{r2}) e menor eixo (C_{r3}), durante a embebição do feijão, nas temperaturas de 40 e 50 °C

Temperatura 40 °C										
Teor de água (decimal b.s.)	Eixos ortogonais (mm)			a/a_0 (%)	b/b_0 (%)	c/c_0 (%)	C_{r1} (%)	C_{r2} (%)	C_{r3} (%)	E_s (%)
	a	b	c							
0,186	10,50	6,91	5,02	100,0	100,0	100,0	65,8	47,8	72,6	68,0
0,860	12,12	8,19	6,14	115,5	118,5	122,4	67,6	50,7	75,0	70,0
1,165	13,08	8,20	6,27	124,7	118,6	124,9	62,6	47,9	76,5	66,9
1,260	13,52	8,31	6,32	128,8	120,3	126,0	61,5	46,8	76,1	66,0
1,313	13,55	8,58	6,46	129,1	124,2	128,8	63,3	47,7	75,3	67,1
1,350	13,65	8,66	6,58	130,1	125,3	131,1	63,4	48,2	76,0	67,4
1,368	13,67	8,60	6,62	130,3	124,5	131,9	62,9	48,4	77,0	67,3
1,408	13,78	8,68	6,69	131,3	125,7	133,2	63,0	48,5	77,0	67,4
1,411	13,80	8,71	6,73	131,5	126,0	134,1	63,1	48,7	77,3	67,5
1,429	13,82	8,67	6,74	131,7	125,4	134,2	62,7	48,7	77,7	67,4
1,439	13,86	8,73	6,83	132,1	126,3	136,1	62,9	49,3	78,3	67,7
1,490	13,92	8,67	6,88	132,6	125,4	137,1	62,3	49,4	79,4	67,5
1,495	13,93	8,72	6,90	132,8	126,2	137,5	62,6	49,5	79,1	67,7
1,495	13,89	8,62	6,88	132,4	124,8	137,2	62,0	49,5	79,8	67,5
Temperatura 50 °C										
Teor de água (decimal b.s.)	Eixos ortogonais (mm)			a/a_0 (%)	b/b_0 (%)	c/c_0 (%)	C_{r1} (%)	C_{r2} (%)	C_{r3} (%)	E_s (%)
	a	b	c							
0,186	10,67	6,64	4,78	100,0	100,0	100,0	62,2	44,8	71,9	65,3
0,849	12,21	7,92	6,14	114,5	119,4	128,5	64,9	50,2	77,4	68,8
1,155	13,41	8,17	5,98	125,7	123,0	125,2	60,9	44,6	73,2	64,8
1,259	13,58	8,31	6,28	127,3	125,2	131,4	61,2	46,2	75,5	65,7
1,308	13,62	8,36	6,39	127,7	125,9	133,8	61,4	46,9	76,4	66,0
1,358	13,65	8,36	6,43	128,0	125,9	134,5	61,2	47,1	76,9	66,0
1,385	13,71	8,38	6,46	128,5	126,2	135,2	61,1	47,1	77,1	66,0
1,425	13,80	8,42	6,57	129,4	126,8	137,5	61,0	47,6	78,0	66,2
1,442	13,82	8,45	6,66	129,6	127,2	139,4	61,1	48,2	78,8	66,5
1,491	13,84	8,41	6,67	129,8	126,6	139,7	60,7	48,2	79,4	66,4
1,498	13,83	8,42	6,75	129,6	126,8	141,4	60,9	48,8	80,2	66,7
1,526	13,67	8,40	6,80	128,1	126,5	142,4	61,5	49,8	81,0	67,4
1,524	13,53	8,33	6,78	126,8	125,4	141,9	61,5	50,1	81,4	67,6

4.3.2 Expansão volumétrica

Os valores experimentais da expansão volumétrica dos grãos de feijão durante a embebição nas diferentes condições de temperatura são apresentados no Quadro 4.

QUADRO 4. Valores experimentais da expansão volumétrica (γ , decimal), em função do teor de água (U^* , decimal b.s.), durante a embebição do feijão, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C

Temperatura de embebição (°C)							
20		30		40		50	
U^*	γ	U^*	γ	U^*	γ	U^*	γ
0,186	1,00	0,186	1,00	0,186	1,00	0,186	1,00
0,724	1,38	0,787	1,60	0,860	1,68	0,849	1,76
0,999	1,80	1,085	1,88	1,165	1,85	1,155	1,94
1,112	1,85	1,179	1,98	1,260	1,95	1,259	2,10
1,185	1,90	1,248	2,05	1,313	2,06	1,308	2,15
1,229	1,93	1,285	2,12	1,350	2,14	1,358	2,17
1,271	1,96	1,329	2,18	1,368	2,14	1,385	2,19
1,297	1,98	1,339	2,19	1,408	2,20	1,425	2,26
1,338	2,08	1,382	2,21	1,411	2,22	1,442	2,30
1,360	2,12	1,408	2,24	1,429	2,22	1,491	2,30
1,380	2,12	1,397	2,24	1,439	2,27	1,498	2,32
1,387	2,14	1,411	2,28	1,490	2,28	1,526	2,31
1,417	2,19	1,424	2,35	1,495	2,31	1,524	2,26
1,426	2,19	1,439	2,38	1,495	2,27	-	-
1,445	2,22	1,451	2,42	-	-	-	-

Observa-se, no Quadro 4, que a expansão volumétrica final dos grãos de feijão variou entre 2,22 e 2,42 para as diversas temperaturas de embebição experimentadas, expansão essa causada por um aumento no volume inicial dos grãos de 122 e 242%, respectivamente. Estes valores estão coerentes com aqueles observados por Bayram et al. (2004b) para grãos de soja, que verificaram um aumento no volume de 129,6 a 146,3%, quando estes grãos de soja foram submetidos à embebição na faixa de temperatura de 30 a 70 °C; e para grãos de trigo, que sofreram incremento no volume de 131,6 a 180,4%, durante a embebição, nas temperaturas de 87 e 97 °C (Bayram et al.,2004a).

Nos Quadros 5 e 6, são apresentados os valores dos coeficientes de determinação, erros médios relativo e estimado e a tendência da distribuição de resíduos para os seis modelos analisados, durante a embebição do feijão nas diversas temperaturas.

QUADRO 5. Coeficientes de determinação (R^2 , decimal), erro médio estimado (SE, decimal) e erro médio relativo (P, %), para os seis modelos ajustados aos dados de expansão volumétrica, durante a embebição do feijão nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C

Modelo	Temperatura (°C)											
	20			30			40			50		
	R^2	SE	P	R^2	SE	P	R^2	SE	P	R^2	SE	P
(5)	0,990	0,03	1,20	0,988	0,04	1,31	0,988	0,04	1,51	0,985	0,04	1,43
(6)	0,984	0,04	2,03	0,985	0,04	1,66	0,985	0,04	1,59	0,988	0,04	1,58
(7)	0,982	0,04	1,93	0,984	0,04	1,54	0,984	0,04	1,50	0,987	0,04	1,36
(8)	0,913	0,10	4,35	0,910	0,11	4,64	0,910	0,12	5,47	0,833	0,15	6,70
(9)	0,984	0,04	2,03	0,985	0,04	1,66	0,985	0,04	1,59	0,988	0,04	1,58
(10)	0,988	0,03	1,31	0,985	0,04	1,84	0,985	0,04	2,13	0,965	0,07	2,83

QUADRO 6. Comportamento da distribuição dos resíduos, tendenciosa ou aleatória, para os seis modelos analisados, durante a embebição do feijão nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C

Modelo	Temperatura (°C)			
	20	30	40	50
Bala e Woods	aleatória	aleatória	aleatória	aleatória
Lang e Sokhansanj	aleatória	aleatória	aleatória	aleatória
Rahman	aleatória	aleatória	aleatória	aleatória
Corrêa	tendenciosa	tendenciosa	tendenciosa	tendenciosa
Linear	aleatória	aleatória	aleatória	aleatória
Exponencial	aleatória	aleatória	aleatória	tendenciosa

De acordo com o Quadro 5, observa-se que, para as quatro temperaturas de embebição utilizadas na determinação da expansão volumétrica do feijão, os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,98, indicando, de acordo com Madamba et al. (1996), uma representação satisfatória do fenômeno em estudo, exceto para os modelos Corrêa (8) e Exponencial (10), na temperatura de 50 °C. Para as condições analisadas, os modelos de Bala e Woods (5), de Lang e Sokhansanj (6), de Rahman (7) e Linear (9) apresentaram menores valores do erro médio estimado (SE) e do erro médio relativo (P), indicando serem adequados para a descrição do fenômeno. Verifica-se ainda, no Quadro 6, que estes modelos apresentaram, para as quatro temperaturas de embebição, uma distribuição aleatória dos resíduos, resultando, assim, em ajustes satisfatórios para os dados experimentais da expansão volumétrica do feijão.

Desta forma, a seleção e recomendação do melhor modelo se fundamentaram na sua simplicidade. Dentre os modelos que apresentaram bons ajustes aos dados experimentais, o modelo Linear (9) foi selecionado para representar o fenômeno de expansão volumétrica do feijão devido à sua simplicidade de aplicação.

Na Figura 2, são apresentadas as tendências de distribuição de resíduos para o modelo Linear em função dos valores estimados da expansão volumétrica do feijão. Os resíduos foram obtidos por meio da diferença entre os valores experimentais e os valores estimados pelo modelo.

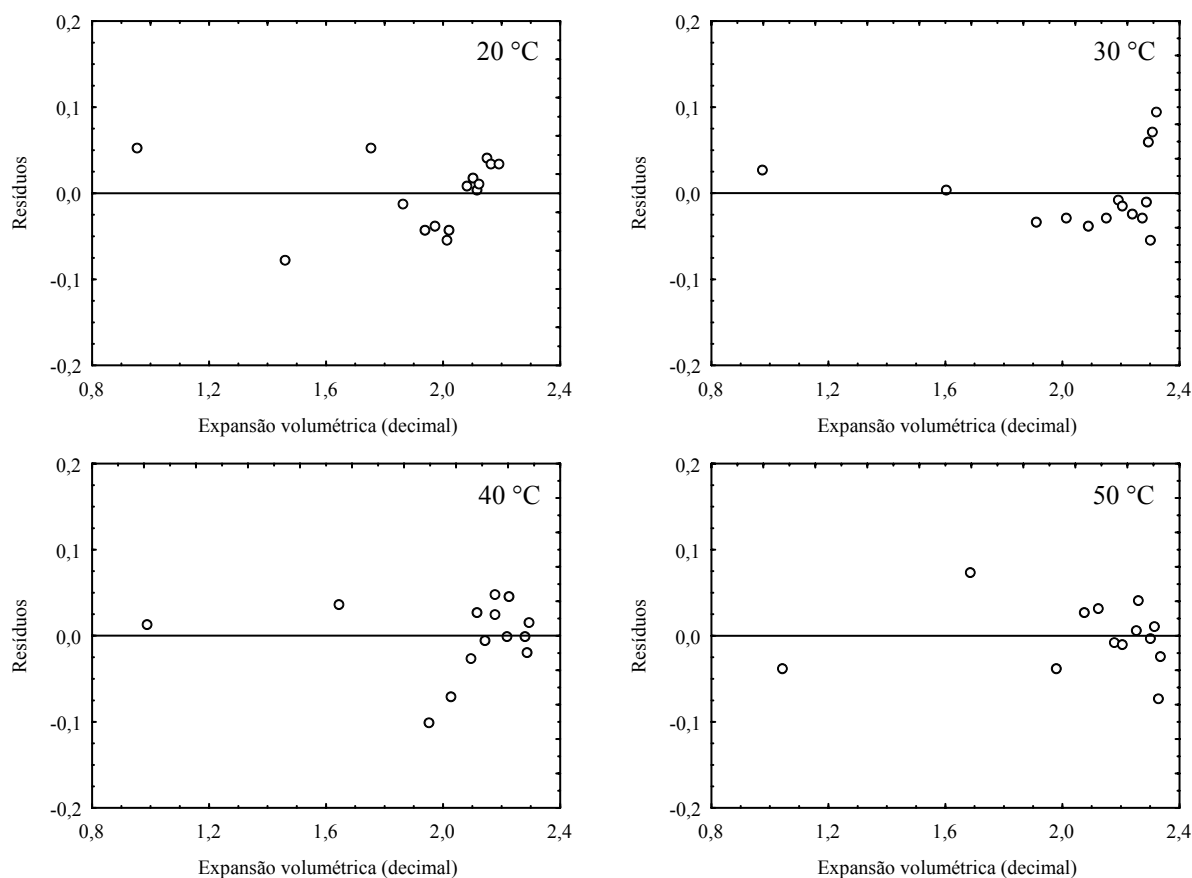


FIGURA 2. Tendência de distribuição dos resíduos para o modelo Linear, durante a embebição do feijão nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C, em função dos valores estimados da expansão volumétrica.

Os coeficientes estimados para o modelo Linear (9) para a descrição da expansão volumétrica do feijão durante a embebição em diferentes temperaturas são apresentados no Quadro 7.

QUADRO 7. Coeficientes do modelo Linear (9), ajustados para representação da expansão volumétrica do feijão, durante a embebição, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C

Temperatura (°C)	Coeficientes	
	c ₁	c ₂
20	0,7668**	0,9694**
30	0,7763**	1,0491**
40	0,8058**	0,9705**
50	0,8573**	0,9726**

**Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t.

Verifica-se, no Quadro 7, que o coeficiente “c₁” do modelo Linear aumentou linearmente com a elevação da temperatura de embebição, podendo ser estimado, satisfatoriamente, para a faixa de temperatura estudada, pela seguinte expressão:

$$c_1 = 0,6962 + 0,003 \cdot T \quad r^2 = 0,9112 \quad (16)$$

Desta forma, utilizando o valor médio do coeficiente “c₂” do modelo Linear estimado para as diversas temperaturas, a expansão volumétrica do feijão, durante a embebição do produto na faixa de temperatura estudada, pode ser estimada por meio da expressão:

$$\lambda = 0,6962 + 0,003 \cdot T + 0,9904 \cdot U^* \quad (17)$$

A Figura 3 mostra o gráfico de correspondência entre os valores da expansão volumétrica, experimentais e estimados pelo modelo Linear, em função da temperatura, durante a embebição do feijão, na faixa de temperatura entre 20 e 50 °C, evidenciando a adequação do modelo para estimar o fenômeno estudado.

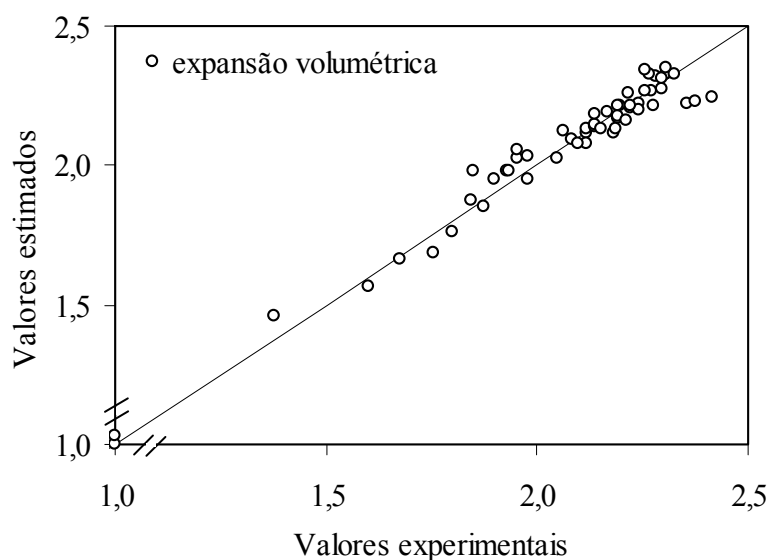


FIGURA 3. Valores da expansão volumétrica, experimentais e estimados pelo modelo Linear, em função da temperatura, durante a embebição do feijão, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C.

4.3.3 Modelagem matemática da embebição

Os valores dos coeficientes de determinação, erros médios relativo e estimado para o modelo de Peleg, ajustados durante a hidratação do feijão, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C, são apresentados no Quadro 8.

QUADRO 8. Coeficientes de determinação (R^2), erros médios relativo (P) e estimado (SE), para o modelo de Peleg, ajustados durante a hidratação do feijão, nas diversas condições de temperatura

Temperatura (°C)	Coeficientes	R^2	SE	P (%)
20	$C_1 = 0,6134^{**}$ $C_2 = 0,6756^{**}$	0,9889	0,037	5,25
30	$C_1 = 0,5381^{**}$ $C_2 = 0,6669^{**}$	0,9768	0,053	7,49
40	$C_1 = 0,4876^{**}$ $C_2 = 0,6502^{**}$	0,9663	0,067	9,63
50	$C_1 = 0,5109^{**}$ $C_2 = 0,6311^{**}$	0,9744	0,062	9,15

**Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t.

Verifica-se, no Quadro 8, que, para as quatro temperaturas utilizadas na embebição do feijão, o modelo de Peleg apresentou significância dos seus parâmetros de regressão ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t, elevados valores dos coeficientes de determinação

(superiores a 96%) e reduzidos valores dos erros médio estimado e relativo (inferior a 10%), indicando, de acordo com Mohapatra e Rao (2005), ser adequado para a descrição do fenômeno de hidratação do feijão na faixa de temperatura estudada.

Na Figura 4, são apresentados os teores de água experimentais e estimados pelo modelo de Peleg, durante a embebição do feijão, em diferentes temperaturas.

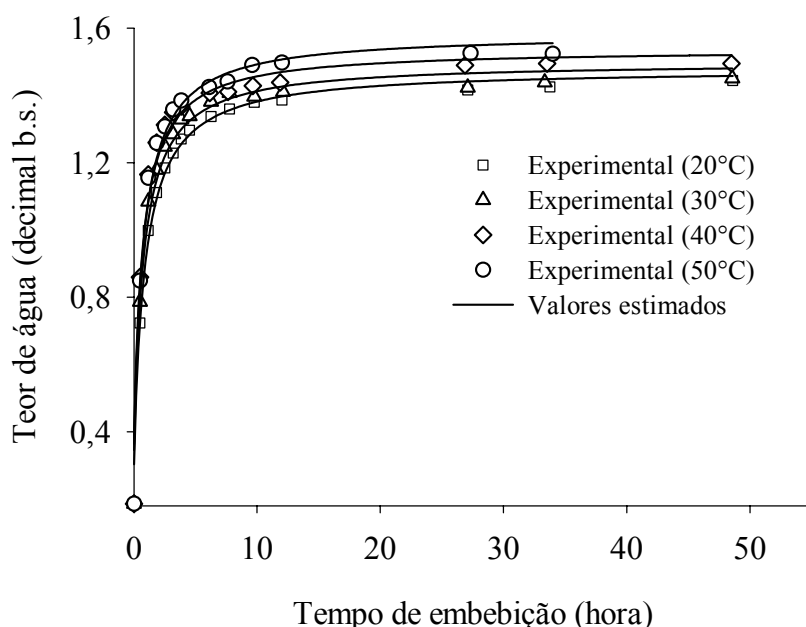


FIGURA 4. Teores de água experimentais e estimados pelo modelo de Peleg, durante a embebição do feijão, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C.

Verifica-se, na Figura 4, que a absorção de água aumentou rapidamente na fase inicial de hidratação, devido, principalmente, à capilaridade natural existente nas camadas mais externas dos grãos e próximas ao hilo e ao processo de difusão. A taxa de absorção de água depende da diferença entre o teor de água de saturação e o teor de água em um determinado tempo, chamada força motriz (Resio et al., 2005). Assim, a hidratação ao longo do tempo ocorre com o aumento do teor de água, associado à diminuição da força motriz e, conseqüentemente, à redução da taxa de absorção de água.

Observa-se, ainda na Figura 4, que, com o aumento da temperatura, ocorreu elevação da taxa de absorção de água, intensificando a dinâmica do fenômeno de hidratação do produto. Resultados semelhantes foram observados para a hidratação de milho (Bhattacharya 1995); sementes de amaranth (Resio et al., 2003; Resio et al., 2005); arroz (Bello et al., 2004); e soja (Bayram et al., 2004b).

Observa-se, ainda no Quadro 8, que as constantes do modelo de Peleg variaram em função da temperatura de embebição, podendo ser estimadas por meio das seguintes equações:

$$C_1 = 0,934 - (0,0208 \cdot T) + (0,0002 \cdot T^2) \quad R^2 = 0,9866 \quad (18)$$

$$C_2 = 0,7085 - (0,0015 \cdot T) \quad r^2 = 0,9753 \quad (19)$$

em que:

T: temperatura de embebição, °C.

A constante C_2 da equação de Peleg está relacionada com a capacidade máxima de absorção de água. Quanto menor o seu valor, maior será a absorção de água pelo produto. De acordo com a Equação 19, verifica-se que a constante C_2 variou linearmente em função da temperatura de embebição, concordando com os resultados observados por Turhan et al. (2002) e Pan e Tangratavalee (2003).

Utilizando-se o modelo de Peleg com as suas constantes descritas em função da temperatura, o teor de água do feijão durante a embebição pode ser estimado por meio da seguinte expressão:

$$U_t^* = \frac{U_o^* + t}{(0,934 - 0,0208 \cdot T + 0,0002 \cdot T^2) + (0,7085 - 0,0015 \cdot T) \cdot t} \quad (20)$$

A Figura 5 mostra o gráfico de correspondência entre os valores do teor de água, experimentais e estimados pelo modelo de Peleg, com suas constantes descritas em função da temperatura, durante a embebição do feijão na faixa de temperatura entre 20 e 50 °C. Verifica-se, por meio da correspondência entre os valores experimentais e estimados, que o modelo de Peleg, representado em função da temperatura de embebição, descreve adequadamente o fenômeno estudado.

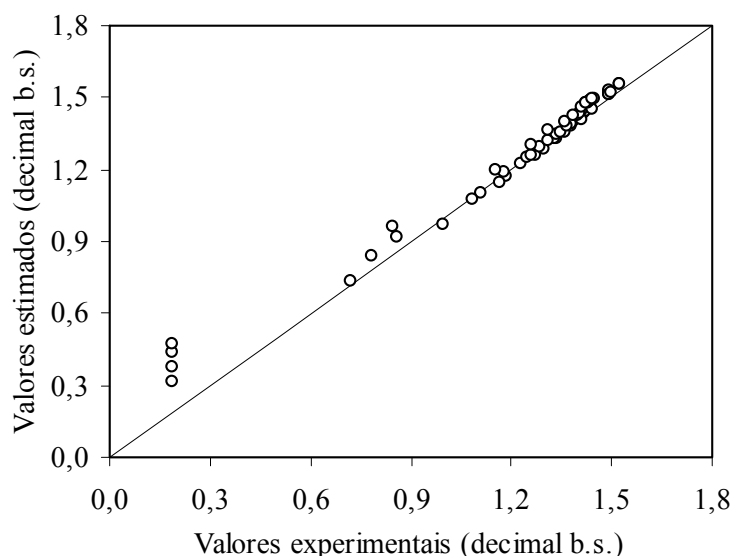


FIGURA 5. Teores de água experimentais e estimados pelo modelo de Peleg, com suas constantes descritas em função da temperatura, durante a embebição do feijão, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C.

4.3.4 Coeficiente de difusão

No Quadro 9, são apresentados os valores médios do coeficiente de difusão do feijão nas diferentes temperaturas de embebição.

QUADRO 9. Valores médios dos coeficientes de difusão ($\times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), durante a embebição do feijão, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C, com e sem a expansão volumétrica dos grãos

Raio equivalente	Temperatura (°C)			
	20	30	40	50
Variável	1,07 a	1,30 a	1,58 a	1,41 a
Constante	0,71 b	0,83 b	1,03 b	0,89 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey (Diferença mínima significativa: $0,112 \times 10^{-9}$; CV: 8,83%).

Analisando os resultados do Quadro 9, verifica-se que o coeficiente de difusão para o feijão, considerando a expansão volumétrica dos grãos, foi significativamente superior aos valores do coeficiente de difusão calculados, utilizando-se o raio equivalente inicial dos grãos. Brooker et al. (1992) relatam que a maioria dos modelos empregados para representar a movimentação da água nos produtos agrícolas foi desenvolvida, negligenciando-se a importância da variação volumétrica do produto. Ramos et al. (2005) também ressaltam que as variações volumétricas devem ser incluídas nos modelos para uma completa descrição e análise do fenômeno. Desta forma, os resultados observados no presente trabalho comprovam

a importância e a necessidade da introdução desta variável nos modelos que representam a hidratação dos produtos agrícolas, objetivando melhor descrição do fenômeno.

Considerando a expansão volumétrica dos grãos, os valores do coeficiente de difusão para o feijão foram de $1,07 \times 10^{-9}$; $1,30 \times 10^{-9}$; $1,58 \times 10^{-9}$ e $1,41 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$, durante a embebição nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C, respectivamente. Bello et al. (2004) observaram valores inferiores a esses do coeficiente de difusão para o arroz polido: de $0,2 \times 10^{-9}$ a $0,47 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ para a faixa de temperatura variando entre 25 e 65 °C, possivelmente, devido ao maior teor de amido do arroz que resulta em uma ligação química mais forte do produto com a água.

Os valores do coeficiente de difusão foram influenciados sensivelmente pela temperatura, e a sua dependência foi descrita pela equação de Arrhenius, como representado na Figura 6.

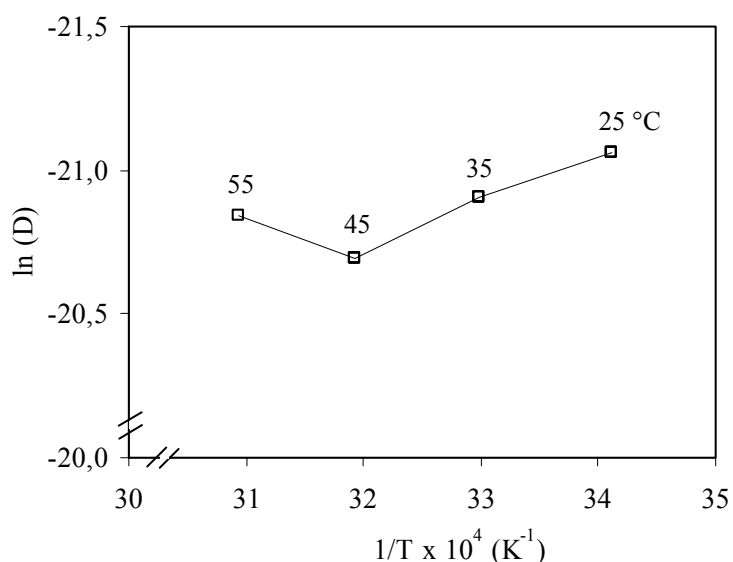


FIGURA 6. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão (D), calculado considerando a expansão volumétrica dos grãos durante a embebição.

Observa-se, na Figura 6, que ocorreu uma sensível mudança na difusividade do feijão na temperatura de 40 °C (ponto de fratura), possivelmente, devido a alterações na textura e estrutura do produto que afetaram a taxa de absorção de água. De acordo com Bello et al. (2004), esta descontinuidade da equação de Arrhenius para a difusividade da água durante a embebição está relacionada com a gelatinização do amido, intensificada com a elevação da temperatura.

A Equação 21 apresenta os coeficientes da equação de Arrhenius ajustados para o coeficiente de difusão do feijão.

$$D = 1,272 \cdot 10^{-8} \cdot \exp\left(-\frac{6,748}{R \cdot T_a}\right) \quad (21)$$

Nos processos de embebição, quanto menor a energia de ativação maior será a difusividade de água no produto. A energia de ativação para a difusão de água do feijão durante a embebição foi de 6,75 kJ mol⁻¹ para a faixa de temperatura entre 20 e 50 °C. Valores superiores a estes foram observados por Resio et al. (2005), que obtiveram uma energia de ativação de 31 kJ.mol⁻¹ para a difusão de água em sementes de amaranth submetidas a uma temperatura de embebição variando entre 30 e 64 °C. Valores próximos ao deste trabalho foram observados por Bhattacharya (1995), que verificou uma energia de ativação de 10,6 e 7,7 kJ mol⁻¹ para o milho in natura e tostado, respectivamente, durante a embebição na faixa de temperatura de 30 a 50 °C. Engels et al. (1986) relatam que a energia de ativação para produtos agrícolas durante a embebição varia entre 22 e 65 kJ mol⁻¹. Assim, ressalta-se que a energia de ativação para a difusão de água do feijão foi ligeiramente inferior aos valores observados na literatura, indicando que o produto em estudo apresenta maior facilidade em absorver água durante a embebição.

4.4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- os grãos de feijão durante a embebição se expandem de maneira diferente nas direções radial e axial, apresentando variações desuniformes em suas dimensões características, maiores para o menor eixo;
- a expansão volumétrica durante a embebição em diferentes temperaturas varia entre 222% e 242%, sendo função, basicamente, do teor de água final;
- baseando-se em parâmetros estatísticos, os modelos de Bala e Woods, Lang e Sokhansanj, Rahman e Linear descrevem adequadamente a expansão volumétrica do feijão;
- a taxa de absorção de água do feijão aumenta com a elevação da temperatura de embebição, sendo o modelo de Peleg recomendado para a descrição da cinética do fenômeno para a faixa de temperatura estudada;

- o coeficiente de difusão, considerando a expansão volumétrica dos grãos, apresenta valores de $1,07 \times 10^{-9}$; $1,30 \times 10^{-9}$; $1,58 \times 10^{-9}$ e $1,41 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C, respectivamente; e

- a relação entre o coeficiente de difusão e a temperatura pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão líquida nos grãos de feijão de $6,75 \text{ kJ mol}^{-1}$.

CAPÍTULO 5

AValiação DA QUALIDADE TECNOLÓGICA E PROTÉICA DO FEIJÃO DURANTE O ARMAZENAMENTO

5.1. INTRODUÇÃO

O feijão é cultivado em quase todos os países de clima tropical e subtropical e assume enorme importância na alimentação humana, fundamentalmente, devido ao seu baixo custo. Trata-se de um alimento rico em proteína, tem plena aceitação nos mais diversos hábitos alimentares e seu cultivo encontra-se disseminado em todo o país.

Quanto ao valor nutricional, o feijão é um bom alimento, pois proporciona elementos essenciais como proteínas, ferro, cálcio, vitaminas, carboidratos e fibras, sendo também rico em lisina, um aminoácido essencial. Devido ao seu alto teor de proteína (23 a 24%), é utilizado como alternativa protéica em substituição a carnes e outros produtos protéicos (Rios et al., 2003).

O consumidor brasileiro prefere produtos recém-colhidos que apresentam características culinárias mais satisfatórias, incluindo maiores taxas de hidratação e menor tempo de cozimento. As características de hidratação e o tempo de cozimento são fatores importantes que afetam a qualidade de grãos e estão altamente correlacionados (Guevara, 1990). Tais características podem ser afetadas pela constituição genética do grão associadas às condições ambientais de produção e armazenamento (Coelho, 1998).

Segundo Ibarra-Perez et al. (1996), quanto mais rápida a absorção de água, maior é a capacidade de cozimento dos grãos. Na cocção, a estrutura do grão é modificada, sendo o amido geleificado e as proteínas, desnaturadas.

Por outro lado, as condições de armazenamento dos grãos influenciam o endurecimento do tegumento e dos cotilédones e, conseqüentemente, o seu tempo de cozimento (Brackmann et al. 2002). O desenvolvimento do fenômeno da casca dura (hardshell) impede a reidratação dos grãos, sendo favorecido pelas condições de baixa umidade relativa na atmosfera de armazenamento e pelo alto teor de água nos grãos. Por outro lado, o endurecimento dos cotilédones, que provoca dificuldades na sua cocção, é um fenômeno irreversível e depende principalmente das condições de armazenamento (Sgarbieri, 1987).

De acordo com Ramos Júnior et al. (2005), o armazenamento aumentou o tempo de cocção e a máxima hidratação de treze cultivares de feijão armazenadas em condições ambientes, por um período de seis meses.

Segundo Rios et al. (2003), o teor de água superior ao recomendado para o armazenamento seguro é uma das principais causas da perda das suas características tecnológicas. Bragantini (1996) argumenta que os teores de água recomendados no armazenamento para minimizar estas perdas deveriam estar entre 13 e 14% (b.u.). As condições de temperatura e umidade relativa durante o armazenamento podem alterar o valor nutritivo dos grãos, inclusive do grão de feijão, favorecendo a formação de compostos antinutricionais, bem como, o desenvolvimento do fenômeno do endurecimento dos grãos (Coelho, 1998). Brackmann et al. (2002) verificaram que baixas temperaturas no ambiente de armazenamento resultam em menores tempos de cocção do feijão.

Existem várias hipóteses que tentam explicar o fenômeno do endurecimento dos grãos. Uma delas seria a polimerização dos polifenóis presentes na casca, que podem migrar para os cotilédones, influenciando a sua composição (Hincks e Stanley, 1987). Ainda segundo estes autores, o processo de lignificação (oxidação e polimerização de compostos fenólicos) talvez seja o responsável por parte da ocorrência do fenômeno de endurecimento em grãos de feijão. Além dos altos níveis de carboidratos, proteínas e minerais, o feijão apresenta compostos antinutricionais como os polifenóis (taninos) e o ácido fítico, que podem estar associados ao endurecimento, aumentando o tempo de cocção e diminuindo sua palatabilidade (Coelho, 1998).

Para Udaeta e Lajolo (1997), os compostos fenólicos estão relacionados com o endurecimento dos grãos na pós-colheita, ocasionando um aumento dos seus níveis e, conseqüentemente, aumento no tempo de cocção após 3 e 6 meses de armazenamento, nas condições de 30 °C de temperatura e 70% de umidade relativa.

Segundo Sartori (1982), os compostos fenólicos também estão correlacionados com o escurecimento de grãos na presença de oxigênio, ocasionado por oxidações enzimáticas

ocorridas no tegumento. Os teores de água, temperatura e o período de armazenamento também influenciam no escurecimento do tegumento, segundo diversos autores (Burr et al., 1968; Sartori, 1982; Iaderoza et al., 1989).

Além da qualidade tecnológica, a nutricional também é de suma importância para o consumo do feijão. A quantidade e qualidade protéicas aliadas à digestibilidade são essenciais para caracterizar um produto de boa qualidade.

De acordo com a literatura especializada, a porcentagem de proteínas no feijão varia entre 16 e 33% para os diversos tipos de feijão, sendo influenciada pela expressão genética, vigor da planta, maturação, tamanho dos grãos, fatores ambientais e condições de armazenamento (Osborn, 1988; Cordeiro, 2001; Antunes e Sgarbieri, 1979; Rios et al., 2003).

A composição química de um alimento indica o seu valor nutritivo, porém, não o caracteriza completamente sob o ponto de vista nutricional. Raramente os nutrientes contidos no alimento estão disponíveis em sua totalidade para o organismo após sua ingestão (Sgarbieri, 1989). Assim, a digestibilidade é a porcentagem de proteína hidrolisada pelas enzimas digestivas e absorvida pelo organismo na forma de aminoácidos ou de compostos nitrogenados. Para o feijão, a digestibilidade de proteínas varia entre 50 e 80%, sendo tipicamente menor que a de produtos de origem animal (80 a 95%) (Navarrete e Bressani, 1981). Essa baixa digestibilidade é considerada o principal fator responsável pelo baixo valor nutritivo dos feijões (Hughes, 1991).

Entretanto, contrapondo-se a estes valores, Cruz et al. (2004), durante a avaliação da digestibilidade protéica de onze cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), verificaram que a digestibilidade verdadeira do produto variou entre 85,31 e 93,97%, sendo menor nos feijões de tegumento colorido. Resultados semelhantes foram constatados por Cruz et al. (2003), que identificaram valores menores de digestibilidade protéica das variedades de maior intensidade na coloração do tegumento dos feijões.

As proteínas presentes nos grãos de feijão, durante o armazenamento, sofrem alterações bioquímicas, resultando na redução da qualidade nutritiva do produto. Segundo Cordeiro (2001), as perdas ao longo do armazenamento, em condições que propiciem a sua deterioração, estão relacionadas, principalmente, com a redução do valor nutritivo e a deterioração das proteínas do feijão.

Antunes e Sgarbieri (1979) avaliaram a influência das condições de seis meses de armazenamento do feijão seco (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade Rosinha G2, nas seguintes situações: a) 12 °C e 52% de umidade relativa; b) 25 °C e 65% de umidade relativa; e c) 37 °C e 76% de umidade relativa. Observaram que a digestibilidade das proteínas se alterou de 62,4% para 58,9; 57,1; e 54,4% para as condições a, b, e c, respectivamente. Ao determinar a

digestibilidade *in vitro* de onze variedades de feijão, Cruz (2003) verificou que, após trinta dias de armazenamento, o produto também apresentou redução dos valores de digestibilidade, sendo de 89,01% para o feijão recém-colhido e de 83,83% aos 30 dias de armazenamento.

Molina et al. (1975) estudaram a inter-relação entre a armazenagem e o valor nutritivo do feijão preto e detectaram que o produto armazenado sob uma temperatura de 21 ± 2 °C e umidade relativa de $77\pm 4\%$, por 3 e 6 meses, sofreu efeito prejudicial na qualidade protéica, reduzindo significativamente a taxa de eficiência protéica.

Além disso, o armazenamento do feijão é normalmente realizado em condições inadequadas para a preservação de suas qualidades, podendo ocorrer infestações de pragas que causam perdas qualitativas e quantitativas, reduzindo os valores nutritivos e comerciais do produto.

Dentre as espécies de pragas encontradas em grãos armazenados e seus subprodutos, destacam-se os insetos como um importante agente responsável por perdas e depreciação dos produtos no período pós-colheita. O ataque de insetos pode causar redução da massa e/ou do volume dos grãos; aquecimento do produto durante o armazenamento; disseminação de microrganismos, favorecendo assim a infestação por patógenos; redução do poder germinativo e do vigor em sementes; além de contribuir para o aumento do custo de produção devido à necessidade de prática de controle (Faroni et al., 1995).

Em vista do exposto, objetivou-se com este trabalho avaliar a qualidade tecnológica e protéica dos grãos de feijão por meio das análises do tempo de cocção, cor, absorção de água em diferentes temperaturas, condutividade elétrica, teor de proteínas e sua digestibilidade, durante quatro meses de armazenamento, em condições ambientais, e na presença do inseto-praga *Acanthocelides obtectus* (Say).

5.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR) e no Laboratório de Enzimologia, Bioquímica de Proteínas e Peptídeos do Instituto de Biotecnologia Aplicada à Agropecuária (BIOAGRO), pertencentes à Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, MG.

Para a condução do experimento, foram utilizados grãos de feijão do grupo vermelho, cultivar vulgarmente denominado de “vermelhinho”, cultivados na safra de inverno do ano de 2004 no município de Cajuri-MG e colhidos manualmente, com teor de água de,

aproximadamente, 0,25 (decimal b.s.) e secos até o teor de água de 0,18 (decimal b.s.). O produto foi submetido ao expurgo com fosfina e acondicionado em frascos de vidro com capacidade para 1,5 kg, durante um período de 112 dias. Os frascos foram mantidos sob condições controladas de temperatura (26 ± 3 °C) e umidade relativa do ar ($55\pm 10\%$), em ambiente de laboratório.

Para infestação dos grãos, foram colocados 20 insetos adultos da espécie *A. obtectus* em cada frasco, que foi fechado com uma tampa telada para garantir a entrada de oxigênio e a sobrevivência dos insetos.

Para avaliação tecnológica e protéica do feijão na presença e ausência do inseto-praga, foram realizadas análises do grau de infestação, teor de água, classificação do produto, porosidade, massa específica aparente, cor, tempo de cocção, condutividade elétrica, absorção de água, teor de proteínas e digestibilidade de proteínas, a cada 28 dias, até os 112 dias de armazenamento.

5.2.1 Classificação do produto

A classificação do produto foi realizada por técnico especializado do Ministério da Agricultura, de acordo com a norma oficial da Portaria Nº 161 de 24 de julho de 1987.

5.2.2 Grau de infestação

O grau de infestação do produto foi determinado segundo a metodologia descrita nas Regras para Análise de Sementes (Brasil, 1992). Foram utilizadas duas repetições contendo, cada uma, 100 grãos. Para facilitar o corte, os grãos de feijão foram imersos em água durante um período de 12 horas. O feijão foi considerado infestado, quando apresentava no seu interior qualquer uma das fases do inseto-praga: ovo, larva, pupa e inseto adulto, e também, pela presença do orifício de saída do inseto. O resultado foi expresso em porcentagem de grãos infestados.

5.2.3 Teor de água

Os teores de água do produto foram determinados pelo método da estufa, 105 ± 1 °C, durante 24 horas, em três repetições (Brasil, 1992).

5.2.4 Porosidade

A porosidade intergranular do feijão foi determinada, utilizando-se um picnômetro eletrônico de comparação a ar, equipado com dispositivo automático da injeção de ar e controle da pressão (Figura 1), segundo o processo descrito por Day, citado por Mohsenin (1986).



FIGURA 1. Foto do picnômetro eletrônico de comparação a ar.

5.2.5 Massa específica aparente

A massa específica aparente foi determinada, utilizando-se uma balança de peso hectolítrico, com capacidade de um litro, em três repetições para cada tratamento.

5.2.6 Coloração dos grãos

O acompanhamento da cor dos grãos de feijão foi realizado pela leitura direta de reflectância das coordenadas do sistema “L” (luminosidade), “a” (tonalidades verde - vermelha) e “b” (tonalidades azul - amarela), em colorímetro tristímulo (iluminante 10°/D65), empregando-se o sistema Hunter de cor (Figura 2).

Para cada amostra, foi utilizada a média de três determinações para avaliação da cor do produto analisado.



FIGURA 2. Representação do sólido de Hunter.

Utilizando-se os valores das coordenadas “L”, “a” e “b”, foram calculadas a diferença total de cor (Equação 1) e o croma que define a intensidade e pureza de uma cor (Equação 2).

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (1)$$

$$C_r = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2)$$

sendo

$$\Delta L = L(t) - L(0) \quad (3)$$

$$\Delta a = a(t) - a(0) \quad (4)$$

$$\Delta b = b(t) - b(0) \quad (5)$$

em que:

ΔE : diferença de cor;

C_r : croma;

t: período de armazenamento, dia;

0 = período inicial.

5.2.7 Tempo de cocção

Para a determinação do tempo de cocção, utilizaram-se amostras previamente maceradas durante 12 horas. O teste foi realizado com aparelho de Mattson (Figura 3), de acordo com a metodologia descrita por Tomé et al. (2000). O aparelho cozedor possui 25 hastes com 21,6 cm de comprimento e massa de 82,0 gramas cada uma. Esta massa representa a força média que a cozinheira utiliza entre os dedos para verificar a maciez e, conseqüentemente, o cozimento do grão de feijão. Na extremidade, a haste apresenta uma ponta afunilada com 0,2 cm de diâmetro e comprimento de 0,9 cm, que foi apoiada, perpendicularmente, sobre cada grão. O aparelho foi colocado no interior de um recipiente metálico com um litro de água em estado de ebulição, mantido em volume constante. Os grãos foram considerados cozidos quando a haste os atravessou, sendo o tempo de cocção da amostra registrado, quando a 13ª haste penetrou o grão.

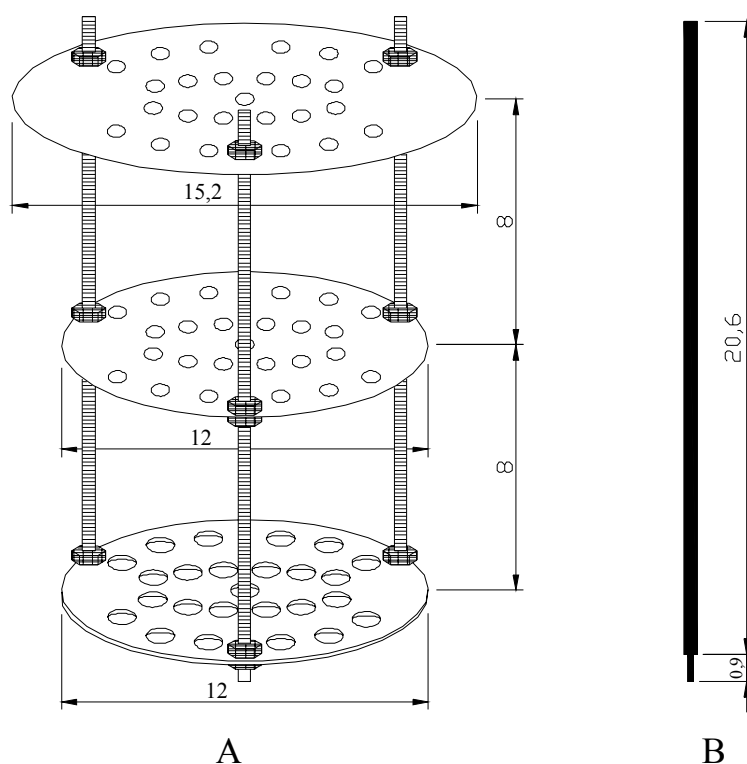


FIGURA 3. (A) Aparelho para determinação do tempo de cocção do feijão; (B) detalhe da haste.

5.2.8 Condutividade elétrica

O teste de condutividade elétrica foi realizado nos grãos de feijão, segundo metodologia descrita por Vieira e Krzyzanowski (1999). Foram contadas e pesadas quatro subamostras de 50 grãos, de cada tratamento. As amostras foram colocadas em copos de plástico com 75 mL de água deionizada e mantidas em uma câmara com temperatura controlada a 25 °C, durante 24 horas. Depois desse período, foi efetuada a leitura da condutividade elétrica por meio de condutivímetro portátil da marca Digimed, modelo DM3.

5.2.9 Absorção de água

Para a estimação da absorção de água, as amostras foram submetidas à maceração em água destilada durante um período de 12 horas. Durante a embebição do produto, foram utilizadas as temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C, de acordo com Abu-Ghnam e McKenna (1997). Foi utilizado um becker (capacidade de 100 mL) contendo 80 mL de água destilada juntamente com 20 g de produto, perfazendo uma relação em massa de 4:1. Depois do período de maceração, as amostras foram retiradas dos beckers e colocadas sobre papel de filtro para escorrimento da água superficial durante dois minutos. O teor de água depois da absorção foi determinado por meio da seguinte equação:

$$U^* = \frac{M_e - M_s}{M_s} \quad (6)$$

em que:

U^* : teor de água do produto, (decimal b.s.);

M_e : massa depois da embebição, kg;

M_s : massa da matéria seca do produto, kg.

5.2.10 Determinação das proteínas

Inicialmente, para obtenção da farinha de feijão, os grãos foram cozidos em água, na proporção de 1:1,5 (partes por volume), em panela de pressão doméstica, durante 40 minutos. Depois do cozimento, o produto foi seco em estufa com ventilação forçada mantida a 60 °C durante 24 horas, sendo, em seguida, moídos os grãos em moinho de facas.

A determinação de proteínas foi efetuada segundo o método de semimicro Kjeldahl, para a quantificação do nitrogênio total, descrito pela Association of Official Analytical Chemists (1984). No cálculo da conversão do nitrogênio em proteínas, foi utilizado o fator 6,25.

5.2.11 Digestibilidade protéica

A digestibilidade das proteínas do feijão foi determinada de acordo com o método de Hsu et al. (1977). Esta metodologia tem como base a quantificação do pH, no qual ocorre a digestão das proteínas com uma mistura de enzimas. Para realização das análises, foram utilizadas as enzimas pancreatina e tripsina, sendo a porcentagem da digestibilidade das proteínas calculada pela seguinte expressão desenvolvida para o feijão por Pires (2005):

$$\hat{y} = -5986,7 + 1725,3 \cdot z - 122,53 \cdot z^2 \quad (7)$$

em que:

y: digestibilidade das proteínas, %;

z: tempo de variação do pH depois de 10 minutos, min.

5.2.12 Análises estatísticas

O experimento foi montado segundo o esquema em parcela subdividida, tendo nas parcelas os níveis de infestação (presença e ausência do inseto-praga) e nas subparcelas o tempo de armazenamento, em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. Para a absorção de água, acrescentaram-se nas parcelas as temperaturas de embebição (20, 30, 40 e 50 °C). Os dados foram analisados por meio de análise de variância e regressão. Para o fator qualitativo, as médias foram comparadas utilizando-se o teste de Tukey, adotando-se o nível de 5% de probabilidade. Para o fator quantitativo, os modelos foram escolhidos com base na significância da equação, pelo teste F e na significância dos coeficientes de regressão utilizando-se o teste de “t”, adotando-se o nível de 5% de probabilidade, do coeficiente de determinação (R^2 ou r^2 para regressão linear simples) e do conhecimento da evolução do fenômeno biológico.

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Classificação do produto

O Quadro 1 mostra o resultado da classificação do feijão para cada tratamento ao longo do armazenamento.

De acordo com o Quadro 1, verifica-se que o feijão se enquadrava inicialmente como Tipo 1. Estas características permaneceram ao longo do armazenamento do produto sem a infestação por insetos. O feijão com a presença do inseto-praga manteve as características iniciais até os 56 dias de armazenamento. Aos 84 e 112 dias depois de armazenado, o produto foi considerado abaixo do padrão, devido, essencialmente, à elevada infestação dos grãos.

QUADRO 1. Classificação do feijão, com e sem a presença do inseto-praga, ao longo do armazenamento

Período de armazenamento (dia)	Tipo final	
	Sem insetos	Com insetos
0	Tipo 1	Tipo 1
28	Tipo 1	Tipo 1
56	Tipo 1	Tipo 1
84	Tipo 1	abaixo do padrão - excesso de carunchos
112	Tipo 1	abaixo do padrão - excesso de carunchos

5.3.2 Grau de infestação

No Quadro 2, são apresentadas as médias do grau de infestação dos grãos de feijão ao longo do período de armazenamento.

QUADRO 2. Valores médios do grau de infestação (%) dos grãos de feijão, na presença e ausência do inseto-praga, durante o armazenamento

Tratamento	Período de armazenamento (dia)				
	0	28	56	84	112
Sem insetos	0,00 a	0,67 a	0,00 a	0,00 b	0,33 b
Com insetos	0,00 a	1,00 a	2,00 a	22,67 a	91,67 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Observa-se, no Quadro 2, que a partir dos 84 dias de armazenamento, a população do inseto-praga, em comparação à testemunha, aumentou significativamente, chegando, ao final do período, com 91,67% dos grãos infestados.

No Quadro 3, são apresentadas as equações ajustadas para o grau de infestação em função do período de armazenamento. Verifica-se que, para o produto sem o inseto-praga, ocorreram diversos valores nulos na avaliação do grau de infestação, sendo a equação ajustada à média dos valores observados. A infestação identificada na testemunha foi, possivelmente, decorrente do ataque de insetos antes da execução do expurgo, com o produto ainda na lavoura.

QUADRO 3. Equação ajustada para o grau de infestação (GI, %) em função do período de armazenamento (t, dias) para o feijão infestado por insetos, com o respectivo coeficiente de determinação e média geral para o produto sem insetos

Tratamento	Modelo	R ²
Sem insetos	GI = 0,2	-
Com insetos	GI = e ^(0,0401⁺⁺ · t)	0,982*

⁺⁺Significativo a 1% pelo teste t.

*Significativo a 5% pelo teste F.

De acordo com o Quadro 3, observa-se que a infestação dos grãos de feijão aumentou exponencialmente ao longo do armazenamento, indicando uma elevada taxa de crescimento dos insetos.

5.3.3 Teor de água

No Quadro 4, são apresentados os valores médios do teor de água do feijão, com e sem inseto-praga, durante o armazenamento.

QUADRO 4. Valores médios do teor de água do feijão (decimal b.s.), com e sem a infestação do inseto-praga, ao longo do período de armazenamento

Tratamento	Período de armazenamento (dia)				
	0	28	56	84	112
Sem insetos	0,187 a	0,182 a	0,178 a	0,159 b	0,153 b
Com insetos	0,187 a	0,185 a	0,180 a	0,177 a	0,265 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Observa-se, no Quadro 4, que o teor de água dos grãos permaneceu em equilíbrio com as condições do ar no interior dos frascos até o 84^o dia de armazenamento. A partir desta data, com a evolução da população do inseto-praga, verificou-se um aumento significativo do teor de água (P<0,05), devido, principalmente, à elevação da taxa respiratória dos grãos e insetos.

No Quadro 5, são apresentadas as equações ajustadas para o teor de água em função do período de armazenamento para os tratamentos analisados.

QUADRO 5. Equações de regressão ajustadas para o teor de água (U^* , decimal b.s.), em função do período de armazenamento (t , dia), para os respectivos tratamentos e coeficientes de determinação

Tratamento	Modelo	R^2
Sem insetos	$U^* = 0,1902 - 0,0003^{++} \cdot t$	0,9317*
Com insetos	$U^* = 0,195 - 0,0013 \cdot t + 2 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,821*

⁺⁺Significativo a 1% pelo teste t.

*Significativo a 5% pelo teste F.

Na Figura 4, são apresentados os valores médios da temperatura e da umidade relativa do ar no ambiente em que foram mantidos os frascos durante o período de armazenamento do feijão.

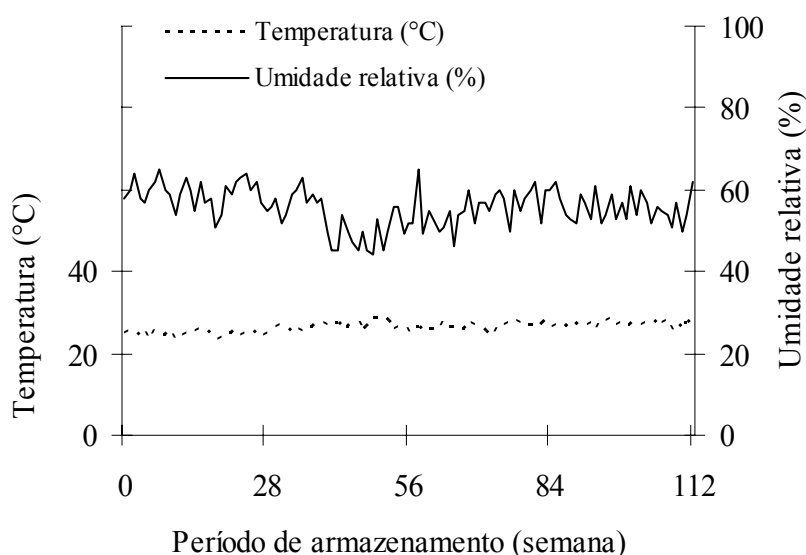


FIGURA 4. Valores médios da temperatura (°C) e da umidade relativa (%) do ar ambiente durante o período de armazenamento do feijão.

Analisando o Quadro 5, observa-se que o teor de água do feijão na ausência do inseto-praga diminuiu, aproximadamente, 0,0003 (decimal b.s.) em cada dia de armazenamento, convergindo para o equilíbrio higroscópico. De acordo com a Figura 4, este fato deve-se à variação das condições ambientais sob as quais foi realizado o experimento (temperatura de $26 \pm 3^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar $55 \pm 10\%$), que apresentaram tendência de aumento da temperatura e redução da umidade relativa ao longo do período de armazenamento. O teor de água do feijão na presença do inseto-praga foi influenciado pelas condições ambientais, causando, inicialmente, redução dos seus valores, e depois da intensificação da infestação do produto e, conseqüentemente, elevação da taxa respiratória, aumentando quadraticamente ao longo do tempo de armazenamento.

5.2.4 Porosidade

No Quadro 6, são apresentados os valores médios da porosidade da massa de grãos com e sem a infestação do inseto-praga ao longo do armazenamento.

QUADRO 6. Valores médios da porosidade da massa de grãos (%), com e sem a infestação do inseto-praga, ao longo do armazenamento

Tratamento	Período de armazenamento (dia)				
	0	28	56	84	112
Sem insetos	41,75 a	43,16 b	46,85 a	47,06 b	48,14 b
Com insetos	42,26 a	45,87 a	48,53 a	50,96 a	59,07 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Observa-se, no Quadro 6, que a porosidade da massa de grãos contendo insetos foi significativamente superior à testemunha aos 28, 84 e 112 dias de armazenamento, devido, principalmente, às perfurações nos tegumentos do feijão, ocasionadas pelos insetos. Os grãos, quando submetidos ao ataque de insetos, liberam grande quantidade de partículas finas que diminuem a porosidade de sua massa. Durante a determinação da porosidade do produto, utilizando o picnômetro, o ar ocupa, além do espaço intergranular, os canais e furos gerados pelos insetos no interior dos grãos, aumentando assim, a magnitude da porosidade como observado claramente no presente trabalho. Apesar de não ser uma característica tecnológica, a porosidade intergranular, determinada por meio do picnômetro de comparação a ar, pode ser utilizada como identificador do grau de infestação do produto.

No Quadro 7, são apresentados os modelos para o desdobramento da interação entre os tratamentos analisados (com e sem infestação) para a porosidade intergranular do feijão ao longo do tempo de armazenamento.

Observa-se que os valores da porosidade (Pr) aumentaram significativamente ao longo do período de armazenamento (t). O modelo linear simples representa satisfatoriamente os valores experimentais, sendo significativo a 5% de probabilidade pelo teste “t”, e apresentando elevado valor do coeficiente de determinação (r^2). Verifica-se que a porosidade do feijão com a presença do *A. obtectus* aumentou, aproximadamente, 0,138% para cada dia de armazenamento. Por outro lado, a porosidade do produto sem o inseto-praga apresentou incremento moderado de, aproximadamente, 0,0596% por dia de armazenamento.

QUADRO 7. Modelos matemáticos para a representação da porosidade intergranular (Pr, %) do feijão ao longo do período de armazenamento (t, dia)

Tratamento	Modelo	r ² (%)
Sem insetos	$\hat{Pr} = 42,06 + 0,0596^+ \cdot t$	0,9065
Com insetos	$\hat{Pr} = 41,598 + 0,1382^+ \cdot t$	0,93,57

⁺Significativo a 5% pelo teste t.

5.3.5 Massa específica aparente

No Quadro 8, são apresentados os valores médios da massa específica aparente para o feijão, com e sem a infestação de inseto-praga, ao longo do armazenamento.

QUADRO 8. Valores médios da massa específica aparente (ρ_{ap}) dos grãos de feijão, com e sem a infestação de inseto-praga, ao longo do armazenamento

Tratamento	Período de armazenamento (dias)				
	0	28	56	84	112
ρ_{ap} (kg m ⁻³)					
Sem insetos	864,0 a	863,9 a	865,0 a	864,6 a	865,2 a
Com insetos	865,8 a	863,8 a	862,2 a	827,3 b	706,7 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Observa-se, no Quadro 8, que a massa específica aparente do feijão apresentou o mesmo comportamento das demais características analisadas anteriormente, sendo significativamente inferior ($P < 0,05$) no produto com a presença do inseto-praga aos 84 e 112 dias depois do armazenamento. Para o feijão na ausência do inseto-praga, a massa específica aparente permaneceu, praticamente, constante ao longo do período de armazenamento. Na presença do *A. obtectus*, os valores da massa específica aparente do feijão diminuíram sensivelmente, principalmente, aos 84 e 112 dias de armazenamento. O *A. obtectus* coloca os ovos soltos na massa de grãos. Depois da eclosão, a larva perfura o tegumento e penetra no interior do produto, alimentando-se diretamente do feijão e promovendo, assim, redução da sua massa e, conseqüentemente, diminuição da massa específica.

5.3.6 Coloração dos grãos

O Quadro 9 mostra os valores médios das coordenadas do sistema “L” (luminosidade), “a” (tonalidades vermelha ou verde) e “b” (tonalidades amarela e azul), bem como a diferença total de cor (ΔE) e o croma (C_T), para os grãos de feijão armazenados na presença e ausência do inseto-praga.

De acordo com o Quadro 9, observa-se que as variáveis analisadas para a avaliação de

cor dos grãos de feijão variaram ao longo do armazenamento, sem apresentar, no entanto, uma tendência clara em função do tempo. Para o produto com e sem o inseto-praga, a diferença total de cor, o croma, as coordenadas “L” e “a” foram significativamente diferentes aos 112 dias de armazenamento para os tratamentos analisados, indicando o efeito do inseto-praga na coloração dos grãos. Esta constatação pode ser explicada devido ao fato de o ataque de insetos provocar nos grãos de feijão danos físicos e perfurações no tegumento e, conseqüentemente, exposição de parte dos cotilédones que apresentam coloração diferenciada em relação à casca do produto.

QUADRO 9. Valores médios das coordenadas do sistema “L”, “a” e “b”, bem como a diferença total de cor (ΔE) e o croma (C_r) para os grãos de feijão armazenados durante 112 dias, na presença e ausência do inseto-praga

Variável	Período de armazenamento (dia)	Tratamento	
		Sem insetos	Com insetos
L	0	23,57 a	24,12 a
	28	22,78 a	22,15 a
	54	22,25 a	21,93 a
	86	22,28 a	22,47 a
	112	21,80 b	23,48 a
a	0	16,57 a	16,12 a
	28	17,38 a	17,61 a
	54	15,53 a	16,23 a
	86	16,60 a	15,89 a
	112	16,51 a	12,50 b
b	0	5,03 a	5,38 a
	28	6,13 a	6,11 a
	54	5,71 a	5,83 a
	86	6,12 a	6,08 a
	112	6,34 a	5,92 a
Diferença de cor	0	0,00 a	0,00 a
	28	1,58 b	2,58 a
	54	1,81 a	2,24 a
	86	1,69 a	1,82 a
	112	2,20 b	3,72 a
Croma	0	17,31 a	16,99 a
	28	18,43 a	18,64 a
	54	16,55 a	17,24 a
	86	17,69 a	17,01 a
	112	17,69 a	13,83 b

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

5.3.7 Tempo de cocção

No Quadro 10, são apresentadas as médias para cada tratamento analisado ao longo do período de armazenamento. Constata-se que aos 112 dias de armazenagem, com a infestação generalizada do produto, o tempo de cocção do feijão infestado por insetos foi significativamente inferior à testemunha. Estes resultados eram esperados, pois os grãos infestados apresentam danificações no tegumento que facilitam a cocção.

QUADRO 10. Valores médios do tempo de cocção (TC, minuto) dos grãos de feijão, com e sem a infestação do inseto-praga, ao longo do período de armazenamento

Tratamento	Período de armazenamento (dia)				
	0	28	56	84	112
Sem insetos	27,27 a	32,75 a	36,31 a	45,27 a	56,14 a
Com insetos	28,05 a	29,52 a	37,43 a	41,87 a	40,15 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

No Quadro 11, são apresentados os modelos para o desdobramento da interação entre os tratamentos analisados (com e sem infestação) ao longo do período de armazenamento. Observa-se que os valores do tempo de cocção (TC) aumentaram significativamente ao longo do período de armazenamento (t), como observado por diversos pesquisadores (Brackmann et al., 2002; Resende et al., 2004; Shiga et al., 2004; Ramos Júnior et al., 2005). O modelo linear simples representa satisfatoriamente os dados experimentais, sendo significativo a 5% de probabilidade pelo teste “t”, e apresentando elevado valor do coeficiente de determinação (r^2). Nota-se que o tempo de cocção do feijão sem a presença do *A. obtectus* aumentou, aproximadamente, 0,251 minuto para cada dia de armazenamento. Por outro lado, o tempo de cocção do feijão com o inseto-praga apresentou incremento menor de, aproximadamente, 0,131 minuto por dia de armazenamento.

QUADRO 11. Modelos matemáticos para a representação do tempo de cocção (TC, minuto) do feijão ao longo do período de armazenamento (t, dia)

Tratamento	Modelo	r^2 (%)
Sem insetos	$\hat{TC} = 25,497 + 0,251^+ \cdot t$	0,9576
Com insetos	$\hat{TC} = 28,093 + 0,131^+ \cdot t$	0,8502

⁺Significativo a 5% pelo teste t.

5.3.8 Condutividade elétrica

No Quadro 12, são apresentadas as médias da condutividade elétrica para cada tratamento, ao longo do tempo de armazenamento. Nota-se que aos 112 dias de armazenamento, a infestação dos grãos de feijão por insetos, em comparação à testemunha, aumentou significativamente os valores da condutividade elétrica. Os insetos promoveram intensa degradação das membranas celulares dos grãos, refletindo maior lixiviação eletrolítica dos solutos celulares. Resultados semelhantes foram observados por Andrade et al. (1999), que verificaram aumento da condutividade elétrica do feijão durante vários níveis de danificação do produto.

QUADRO 12. Valores médios da condutividade elétrica (CE, $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) dos grãos de feijão, com e sem a infestação do inseto-praga, ao longo do período de armazenamento (dia)

Tratamento	Período de armazenamento (dia)				
	0	28	56	84	112
Sem insetos	64,54 a	68,96 a	74,90 a	82,03 a	93,49 a
Com insetos	64,56 a	69,60 a	75,65 a	99,54 a	263,85 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

No Quadro 1, são apresentados os modelos para o desdobramento da interação entre os tratamentos analisados (com e sem infestação) ao longo do tempo de armazenamento. Observa-se que os valores da condutividade elétrica aumentaram significativamente ao longo do período de armazenamento (t), indicando uma intensa deterioração das membranas. No produto sem a presença do inseto-praga, a condutividade elétrica aumentou, aproximadamente, $0,253 (\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1})$, para cada dia de armazenamento, indicando que, ao longo do tempo, ocorre degradação das membranas celulares. Os modelos linear simples e exponencial representam satisfatoriamente os dados experimentais da condutividade elétrica, sem a presença do inseto-praga e com infestação, respectivamente.

QUADRO 13. Equações de regressão ajustadas para a condutividade elétrica (CE, $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) do feijão em função do período de armazenamento (t, dia) para os respectivos tratamentos e coeficientes de determinação

Tratamento	Modelo	R ² (%)
Sem insetos	$CE = 62,586 + 0,253^+ \cdot t$	0,9662*
Com insetos	$CE = 59,905 + e^{(0,047^+ \cdot t)}$	0,9912*

⁺Significativo a 5% pelo teste t.

* Significativo a 5% pelo teste F.

5.3.9 Absorção de água

Para a variável absorção de água, a interação dos fatores analisados (infestação do produto, período de armazenamento e temperatura de embebição) foi significativa. Assim, procedeu-se ao desdobramento da absorção de água em função da temperatura e do período de armazenamento.

No Quadro 14, são apresentadas as equações de regressão ajustadas para os dados de absorção de água em função da temperatura de embebição e do período de armazenamento. Pela análise dos resultados, observa-se que as equações ajustadas se mostraram satisfatórias na descrição do fator em estudo, incorporando o efeito da temperatura e do período de armazenamento na absorção de água do feijão.

QUADRO 14. Equações de regressão ajustadas para absorção de água (Ab) em função da temperatura de embebição (T) e do período de armazenamento (P)

Tratamento	Modelo	R ²
Sem insetos	$Ab=1,4424 - (0,0005 \cdot P) - (0,0048 \cdot T) + (0,000001 \cdot P^2) + (0,00001 \cdot T^2) + (0,000001 \cdot P \cdot T)$	0,9491*
Com insetos	$Ab=1,4266 + (0,0006 \cdot P) - (0,0055 \cdot T) + (0,000001 \cdot P^2) + (0,0002 \cdot T^2) - (0,0001 \cdot P \cdot T)$	0,6836*

* Significativo a 5% pelo teste F.

em que:

Ab: absorção de água, (decimal b.s.);

T: temperatura de embebição, °C;

P: período de armazenamento, dias.

A Figura 5 mostra a superfície de resposta, ajustada de acordo com a equação apresentada no Quadro 14, para a absorção de água do feijão em função da temperatura de embebição e do tempo de armazenamento, sem a presença do inseto-praga.

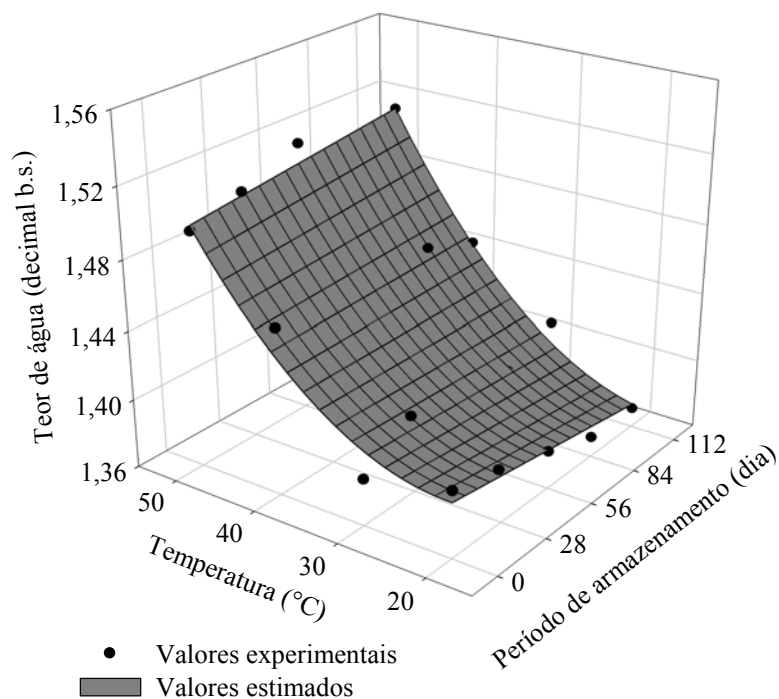


FIGURA 5. Valores experimentais e estimados da absorção de água para o feijão (decimal b.s.), sem a presença de *A. obtectus*, em função da temperatura de embebição e do tempo de armazenamento.

Observa-se, na Figura 5, que os valores da absorção de água foram incrementados com a elevação da temperatura de embebição, fato ocasionado, principalmente, pelo aumento do coeficiente de difusão, responsável pelo transporte de água da superfície do grão para as camadas interiores. Resultados semelhantes foram observados por Bhattacharya (1995), que verificou aumento da hidratação das sementes de milho com a elevação da temperatura de embebição de 30 para 100°C.

A Figura 6 mostra a superfície de resposta para a absorção de água do feijão com a presença do inseto-praga, em função da temperatura de embebição e do tempo de armazenamento. Verifica-se que a absorção de água dos grãos de feijão foi influenciada pela danificação causada pelos insetos ao longo do período de armazenamento. A presença do inseto-praga promoveu aumento acentuado nos valores da absorção de água, principalmente aos 112 dias de armazenamento, quando se observa uma infestação generalizada do produto, com a conseqüente danificação do tegumento, para todas as temperaturas de embebição analisadas.

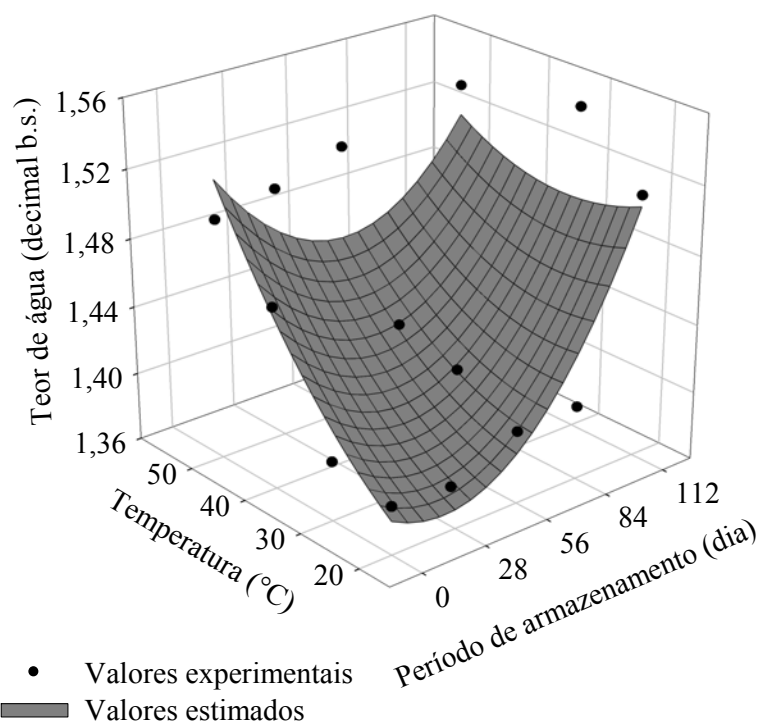


FIGURA 6. Valores experimentais e estimados da absorção de água para o feijão (decimal b.s.), com a presença de *A. obtectus*, em função da temperatura de embebição e do tempo de armazenamento

5.3.10 Determinação das proteínas

Os valores médios do teor de proteínas para o feijão ao longo do armazenamento, com e sem a presença do inseto-praga, são apresentados no Quadro 15. A concentração de proteína variou durante os 112 dias de armazenamento entre 22,93 e 23,66% para o feijão sem a presença de *A. obtectus*, e de 23,33 a 27,73% para o produto infestado pelo inseto-praga. Estes valores estão coerentes com aqueles observados por Osborn (1988) que relata valores entre 16 e 33% de acordo com a variedade do feijão e por Cruz (2000) que, trabalhando com o feijão do grupo vermelho, obteve 21,84% de proteína.

QUADRO 15. Valores médios do teor de proteínas (%) dos grãos de feijão, com e sem a presença do inseto-praga, ao longo do período de armazenamento (dia)

Tratamento	Período de armazenamento (dia)				
	0	28	56	84	112
Sem insetos	22,93 a	24,00 a	23,49 a	23,98 a	23,66 b
Com insetos	23,53 a	23,33 a	23,84 a	24,32 a	27,73 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Analisando o Quadro 15, verifica-se que o teor de proteínas do feijão, sem a presença do *A. obtectus*, não se altera ao longo do armazenamento. Nota-se que a presença do inseto-praga aumentou sensivelmente o teor de proteínas do feijão depois de 112 dias de armazenagem. A

larva do inseto *A. obtectus* alimenta-se diretamente do feijão, assimilando e concentrando, principalmente, os compostos protéicos. Assim, este elevado teor de proteína identificado nos grãos com a presença do inseto-praga aos 112 dias de armazenagem, possivelmente, deve-se à grande quantidade de insetos ainda presentes no interior dos grãos, principalmente nos estágios de larva e pupa, que apresentam na sua constituição básica elevados teores de proteína.

No Quadro 16, são apresentadas as equações ajustadas para o teor de proteínas em função do período de armazenamento. Verifica-se que, para o produto sem o inseto-praga, não ocorreu alteração significativa ao longo do armazenamento, coincidindo com a média geral dos valores observados. Já na presença do inseto-praga, o teor de proteína dos grãos durante o armazenamento pode ser descrito adequadamente pelo modelo exponencial.

QUADRO 16. Equação ajustada para o teor de proteína (Tp, %) em função do período de armazenamento (t, dia) para o feijão infestado por insetos, com o respectivo coeficiente de determinação, e média geral para o produto sem insetos

Tratamento	Modelo	R ²
Sem insetos	Tp = 23,61	-
Com insetos	$Tp = 0,0085 \cdot e^{(0,0555^+ \cdot t)} + 23,4731$	0,9945*

⁺ Significativo a 5% pelo teste t.

* Significativo a 5% pelo teste F.

5.3.11 Digestibilidade protéica

A digestibilidade do produto reflete a eficiência da utilização protéica da dieta, sendo uma característica condicionante da sua qualidade (Chiaradia, 1997). De acordo com os resultados obtidos, não foi identificado efeito entre os tratamentos analisados, ou seja, a presença do inseto-praga e o tempo de armazenagem não interferiram na digestibilidade das proteínas do feijão.

Os valores da digestibilidade das proteínas do feijão, com e sem a presença do *A. obtectus*, durante o armazenamento, são apresentados no Quadro 17.

QUADRO 17. Valores da digestibilidade das proteínas (%) dos grãos de feijão, com e sem a presença do inseto-praga, ao longo do período de armazenamento (dia)

Tratamento	Período de armazenagem (dias)				
	0	28	56	84	112
Sem insetos	71,40	69,42	68,88	67,75	67,24
Com insetos	70,96	70,21	68,80	73,52	70,67

Observa-se, no Quadro 17, que os limites inferior e superior dos valores da digestibilidade das proteínas foram de 67,24 e 73,52% durante o armazenamento, na presença e ausência do *A. obtectus*. Pires (2002) verificou que a digestibilidade *in vitro*, média de 11 variedades de feijão, correspondeu a 70,5% daqueles valores verificados na digestibilidade *in vivo*. Entretanto, Cruz (2003) obteve valores superiores a estes para a digestibilidade do feijão do grupo vermelho, sendo de 89,01% para o produto recém-colhido e 83,83% após 30 dias de armazenamento. Discrepâncias verificadas na digestibilidade do feijão podem ser resultantes da interação de vários fatores como cultivares analisadas, condições de plantio, tempo de armazenamento, dentre outros, que isolados ou em conjunto, interferem na digestibilidade do produto (Nielson, 1991).

5.4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- a presença do inseto *Acanthocelides obtectus* causa deterioração intensa do feijão, promovendo redução da massa específica aparente e aumento da condutividade elétrica dos grãos, resultando na alteração da qualidade tecnológica do produto;
- a porosidade intergranular, determinada por meio do picnômetro de comparação a ar, pode ser utilizada como identificador do grau de infestação do produto;
- a cor dos grãos de feijão é influenciada pela presença do inseto-praga, que perfura o produto e expõe a coloração dos cotilédones;
- o tempo de cocção dos grãos de feijão aumenta ao longo do período de armazenamento, independentemente da presença do inseto-praga;
- a temperatura de embebição aumenta a absorção de água dos grãos de feijão, sendo intensificada pela presença do inseto-praga ao longo do período de armazenamento;
- o teor de proteínas do feijão sem a presença do *A. obtectus* não se altera ao longo do armazenamento, porém, a presença de *A. obtectus* nas fases imaturas no interior do produto aumenta o nível de proteínas do feijão; e

- a digestibilidade das proteínas dos grãos de feijão não é afetada pela presença do inseto *A. obtectus* e pelo tempo de armazenamento.

CAPÍTULO 6

COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS GRÃOS DE FEIJÃO

6.1. INTRODUÇÃO

O estudo das características mecânicas dos produtos agrícolas é importante para que os equipamentos possam ser desenvolvidos para atingir a máxima eficiência sem comprometer a qualidade final do produto. As trincas e quebras ocorrem nos grãos, quando os esforços, aos quais são submetidos, excedem a força de resistência do material (Liu et al., 1990).

Durante a colheita, secagem, manuseio, transporte e armazenamento, os grãos são submetidos a uma série de pressões estáticas de várias magnitudes e dinâmicas, como impacto de alta velocidade, causando escoriações, esmagamento e trincas, aumentando a sua suscetibilidade à deterioração durante o armazenamento (Bargale-Praveen et al., 1995).

Dentre as diversas propriedades mecânicas, o módulo de deformidade permite que sejam realizadas comparações de resistências relativas entre os diversos materiais. Para a determinação do módulo de deformidade do produto, faz-se a separação da sua deformação total nas duas componentes elástica e plástica. Assim, com a obtenção de curvas de força em função da deformação durante a aplicação de cargas ao produto e considerando a sua deformação total, obtém-se o módulo de deformidade total do produto. Segundo Couto et al. (2002), no estudo do comportamento mecânico de frutos de café, o módulo de deformidade é considerado mais significativo que o de elasticidade, pois, quando um produto é comprimido, a deformação total é que tem aplicação prática.

Segundo a ASAE (2003), o módulo de deformidade aparente de um corpo convexo pode ser determinado por meio da seguinte expressão:

$$E = \frac{0,531 \cdot F \cdot (1 - \mu^2)}{D^{3/2}} \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (1)$$

em que:

E: módulo de deformidade, Pa;

F: força, N;

D: deformação total (elástica e plástica) do corpo nos pontos de contato com a placa superior e inferior, m;

μ : razão de Poisson; e

R, r: raios de curvatura no ponto de contato, m.

O módulo de deformidade é função da razão de Poisson, que assume valores constantes para cada material, sendo seu valor desconhecido para o feijão. Na ausência deste valor, Batista et al. (2003) utilizaram outra variável proporcional ao módulo de deformidade, denominada módulo proporcional de deformidade, representado pela seguinte expressão:

$$E_p = \frac{E}{(1 - \mu^2)} = \frac{0,531 \cdot F}{D^{3/2}} \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (2)$$

em que:

E_p : módulo proporcional de deformidade, Pa.

Diversos fatores afetam as propriedades mecânicas dos produtos agrícolas, destacando-se entre eles, as condições de secagem, o teor de água, o tipo de força e a região do grão, na qual esse tipo de força é aplicado (Mohsenin, 1986; Prussia e Campbell, 1985; Li et al., 1989; Zhang et al., 1989).

Na determinação do módulo proporcional de deformidade dos frutos de café nos estádios de maturação verde, verdoengo e cereja, com diferentes teores de água, Couto et al. (2002) concluíram que o módulo proporcional de deformidade diminui com o aumento da deformação do fruto.

Vários pesquisadores afirmam que a temperatura do ar de secagem é um dos fatores que mais afetam as propriedades mecânicas de grãos agrícolas (Gustafson e Hall, 1972; White et al., 1982).

Batista et al. (2003) verificaram que o módulo proporcional de deformidade de frutos de café para a faixa de teor de água de 0,14 a 1,50 (b.s.), nos três estádios de maturação, submetidos às temperaturas de secagem (40, 50 e 60 °C), ficou reduzido com o aumento das

deformações do produto. Nestas condições, o módulo proporcional de deformidade apresentou valores entre $2,0 \times 10^7$ e $18,0 \times 10^7$ Pa para os frutos de café cereja; de $5,0 \times 10^7$ a $40,0 \times 10^7$ Pa para os frutos verdes; e de $1,0 \times 10^7$ a 50×10^7 Pa para os frutos verdoengos.

O efeito do teor de água e da temperatura do ar de secagem no comportamento mecânico de grãos de soja foi verificado por Liu et al. (1990), utilizando o teste de compressão. Com a redução da temperatura do ar de secagem, as forças para a ruptura do grão aumentaram e com a elevação do teor de água do produto, estas forças diminuíram.

Durante a avaliação do comportamento mecânico das sementes de girassol, Gupta e Das (2000) verificaram que, com o aumento do teor de água do produto de 0,04 para 0,20 (decimal b.s.), a força para a ruptura do produto foi reduzida e sua deformação aumentou.

Já Henry et al. (2000a), estudando a resistência da soja à compressão em três orientações e para quatro teores de água, observaram que, ao comprimir o grão, a força de ruptura perpendicular à divisão dos cotilédones foi maior que para as outras orientações, mas apresentou menor deformação, e que a resistência à compressão diminuiu com o aumento do teor de água.

Oliveros-Tascón et al. (2002) avaliaram a influência do ataque da broca-do-café na firmeza dos frutos de café cereja e pergaminho (seco e úmido) submetidos aos testes de compressão. Para os frutos cereja, não houve diferença significativa entre a firmeza dos frutos sadios e brocados. Já para o café em pergaminho, a firmeza dos grãos sadios foi estatisticamente superior àquela dos grãos brocados, evidenciando a influência do ataque dos insetos nas propriedades mecânicas dos frutos de café.

Henry et al. (1996) relataram que a força necessária para deformar materiais biológicos pode ser descrita como uma função da deformação de acordo com a série de Taylor:

$$F = d \cdot x + e \cdot x^2 + f \cdot x^3 \quad (3)$$

em que:

x: deformação, mm;

d, e, f: coeficientes elásticos do modelo, unidades de $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$, $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ e $\text{N}\cdot\text{mm}^{-3}$, respectivamente.

Este modelo tem sido, satisfatoriamente, utilizado para descrever o comportamento mecânico de folhas de tabaco (Henry, et al., 2000b) e grãos de soja (Henry et al., 1996; Henry et al., 2000a; Pan e Tangratavalee, 2003).

A Figura 1 ilustra a curva de força versus deformação representada de acordo com a Equação 3. A utilização deste modelo permite a identificação de três seções distintas ao longo

da curva: a seção inicial côncava, a seção intermediária que inclui o ponto de inflexão e a seção convexa em que a inclinação da curva diminui.

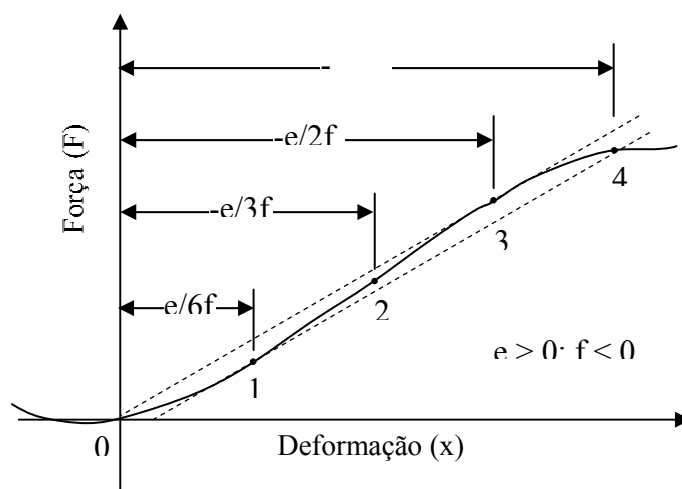


FIGURA 1. Ilustração da curva força vs deformação do modelo $F = d \cdot x + e \cdot x^2 + f \cdot x^3$; para $e > 0$; $f < 0$; a primeira região inclui a curva da origem até o ponto 1; a segunda região inclui a curva dos pontos 1 a 3; e a terceira região inclui o ponto 3 até o final do teste; PI = ponto de inflexão (Henry et al., 1996).

Baseado na Equação 1, a inclinação da curva força-deformação para um ponto qualquer é a tangente (T), obtida a partir da primeira derivada da equação 1:

$$T = d + 2e \cdot x + 3f \cdot x^2 \quad (4)$$

A tangente máxima é obtida no ponto de inflexão da curva, em que $x = -e/3f$, sendo considerada um indicador da dureza do produto. A secante (S), inclinação da reta que passa pela origem e por um ponto qualquer da curva, é expressa da seguinte forma:

$$S = a + e \cdot x + f \cdot x^2 \quad (5)$$

A secante máxima corresponde ao ponto onde o valor de deformação x é $-e/2f$, descrevendo a elasticidade em diferentes níveis de deformação.

Henry et al. (2000a) aplicaram este modelo para estudar a resistência à compressão de nove variedades de soja, colhidas em duas diferentes épocas. Os autores observaram que os módulos máximos de tangente e secante diminuíram com o aumento do teor de água.

Considerando o exposto e a limitação de informações teóricas presentes na literatura sobre as propriedades mecânicas do feijão, desenvolveu-se esta pesquisa com os objetivos de verificar a influência do teor de água nos valores da força máxima de compressão para deformações fixas e determinar o módulo proporcional de deformidade de grãos de feijão

submetidos à compressão em diferentes posições, assim como analisar o efeito da infestação de insetos *Acanthocelides obtectus* (Say) nas propriedades mecânicas dos grãos de feijão durante a cocção e em diversas temperaturas de embebição, ao longo de 112 dias de armazenamento em condições ambientais.

6.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), pertencente à Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, MG.

6.2.1 Teste de compressão durante a secagem

Para condução do experimento, foram utilizados grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) do grupo vermelho, cultivar vulgarmente denominado de “vermelhinho”, cultivados na safra de inverno do ano de 2003 no município de Cajuri-MG e colhidos manualmente, com teor de água de, aproximadamente, 0,45 (decimal b.s.).

Os diversos teores de água foram obtidos pela secagem realizada em estufa com ventilação forçada, mantida à temperatura de 40 °C e umidade relativa de 25%. A redução do teor de água ao longo da secagem foi acompanhada pelo método gravimétrico (perda de massa), conhecendo-se o teor de água inicial do produto, até atingir o teor de água final de 0,13 (decimal b.s.), com auxílio de uma balança analítica com resolução de 0,01 g.

O teor de água do produto foi determinado pelo método de estufa, a 105±1 °C, durante 24 horas, em três repetições (Brasil, 1992). Para cada teor de água obtido (0,43; 0,37; 0,31; 0,26; 0,21; 0,17 e 0,14 decimal b.s.), as amostras foram homogeneizadas e encaminhadas para o teste de compressão, à temperatura controlada de 22±2 °C.

Os ensaios experimentais de compressão dos grãos, testados individualmente, foram realizados com uma máquina de ensaio universal de teste modelo “TA Hdi Texture Analyser”, utilizando uma célula de carga de 500 N.

Os grãos foram submetidos à compressão uniaxial, entre duas placas paralelas, aplicada em suas três dimensões principais - espessura (P_1), largura (P_2) e comprimento (P_3) -, indicadas na Figura 2, a uma taxa de aplicação de força de 0,001 m s⁻¹. Para cada uma das posições foram utilizados dez grãos de feijão.

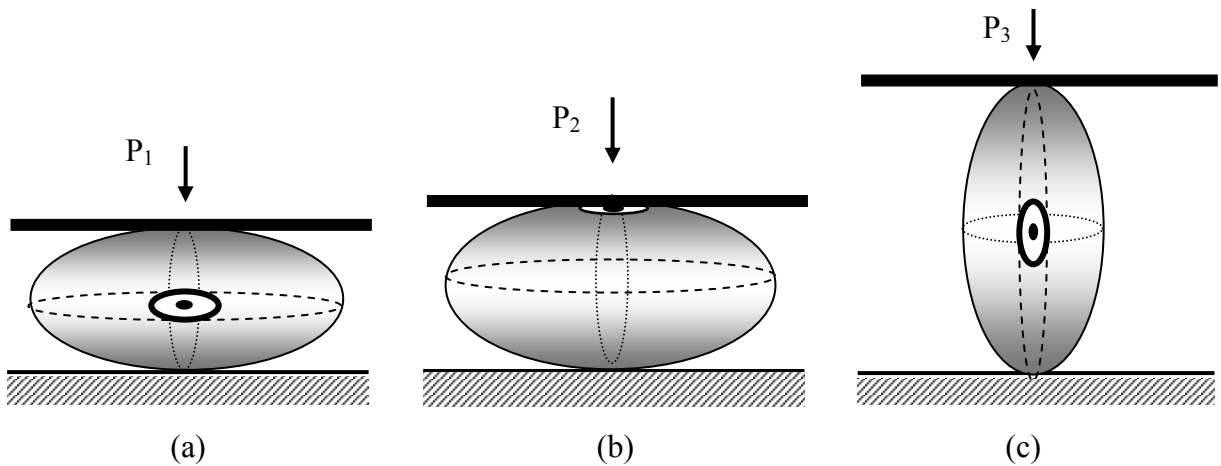


FIGURA 2. Orientações dos grãos de feijão durante os ensaios de compressão, (a) menor eixo, espessura; (b) eixo médio, largura; e (c) maior eixo, comprimento.

O módulo proporcional de deformidade do feijão (E_p) foi determinado de acordo com a Equação 2, sendo obtido para as deformações de $0,4 \times 10^{-3}$; $0,8 \times 10^{-3}$; $1,2 \times 10^{-3}$; $1,6 \times 10^{-3}$ e $2,0 \times 10^{-3}$ m, adaptadas das deformações utilizadas por Batista et al. (2003).

Os valores dos raios de curvatura (r e R) dos grãos nos pontos de contato, para cada posição e teor de água, foram obtidos por meio de ajustes de circunferências às curvaturas do corpo, segundo os planos coordenados relevantes a cada posição de compressão de acordo com Couto et al. (2002): P_1 - força aplicada com o hilo na horizontal (posição de repouso); P_2 - força aplicada sobre o hilo; e P_3 - força aplicada com o hilo na posição vertical, conforme ilustra a Figura 3.

Os dados da força máxima de compressão e do módulo proporcional de deformidade do feijão foram representados em função do teor de água e da posição de compressão dos grãos.

O experimento foi montado segundo o esquema fatorial $7 \times 5 \times 3$ (7 teores de água, 5 deformações e 3 posições de compressão), no delineamento inteiramente casualizado, com dez repetições.

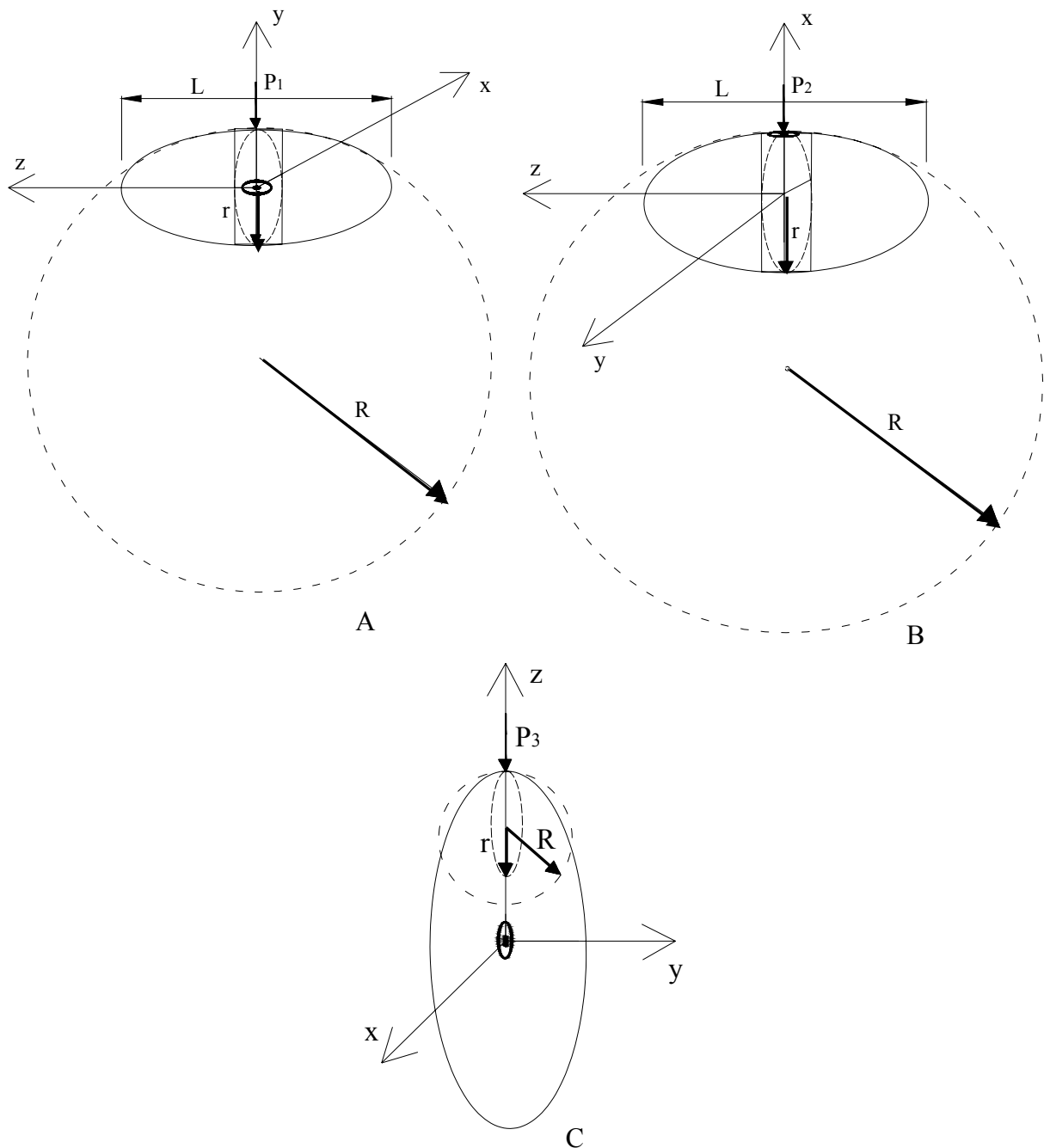


FIGURA 3. Raios de curvatura do grão de feijão na região de contato entre o produto e a placa de compressão, (A) compressão na posição P_1 ; (B) compressão na posição P_2 ; e (C) compressão na posição P_3 .

6.2.2 Propriedades mecânicas do feijão ao longo do armazenamento na presença do inseto-praga

Para condução desta etapa do experimento, foram utilizadas as amostras provenientes do armazenamento descrito no Capítulo 5.

As análises mecânicas do feijão foram realizadas no produto infestado ou não por inseto-praga, no início e a cada 28 dias, totalizando 112 dias de armazenagem.

6.2.2.1 Teste de compressão

Os grãos foram submetidos à compressão uniaxial, entre duas placas paralelas, aplicada em suas três dimensões principais - espessura (P_1), largura (P_2) e comprimento (P_3) - a uma taxa de aplicação de força de $0,001 \text{ m s}^{-1}$, como descrito no item 6.2.1.

Com a obtenção da curva de força em função da deformação, determinou-se a força de compressão para as deformações de $0,4 \times 10^{-3}$; $0,8 \times 10^{-3}$; $1,2 \times 10^{-3}$ e $1,6 \times 10^{-3}$ m, adaptadas das deformações utilizadas por Batista et al. (2003).

As três posições de compressão (P_1 , P_2 e P_3) foram analisadas individualmente, considerando-se o esquema em parcela subdividida, tendo nas parcelas os níveis de infestação (presença e ausência de insetos) e as deformações ($0,4 \times 10^{-3}$; $0,8 \times 10^{-3}$; $1,2 \times 10^{-3}$ e $1,6 \times 10^{-3}$ m) e nas subparcelas o tempo de armazenamento (0, 28, 56, 84 e 112 dia), no delineamento inteiramente casualizado, com dez repetições.

6.2.2.2 Teste de compressão durante a embebição do produto em diferentes temperaturas

O feijão foi submetido à embebição em água destilada nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C, durante um período de 12 horas. Foram utilizados beakers (capacidade de 100 mL) contendo 80 mL de água destilada juntamente com 20 gramas de produto em cada amostra, perfazendo uma relação em massa de 4:1. Depois do período de embebição, as amostras foram retiradas dos beakers e colocadas sobre papel de filtro para escoamento da água superficial durante dois minutos. Em seguida, procedeu-se à compressão uniaxial, entre duas placas paralelas, dos grãos na posição de repouso, a uma taxa de aplicação de força de $0,001 \text{ m s}^{-1}$. Para cada condição experimental, foram utilizados dez grãos de feijão, sendo o ensaio de compressão finalizado quando ocorreu a ruptura do tegumento do produto.

O experimento foi montado segundo o esquema em parcela subdividida, tendo nas parcelas os níveis de infestação (presença e ausência de insetos) e as temperaturas de embebição (20, 30, 40 e 50 °C) e nas subparcelas o tempo de armazenamento (0, 28, 56, 84 e 112 dia), no delineamento inteiramente casualizado, com dez repetições.

6.2.2.3 Teste de compressão durante a cocção do produto

Os grãos de feijão, na presença e ausência de inseto-praga, foram submetidos à embebição em água destilada durante 12 horas, na temperatura de 20 °C. Em seguida, amostras de 50 g foram colocadas em um recipiente metálico mantido à pressão atmosférica, contendo 500 mL de água destilada em ebulição e com volume constante. Em intervalos

regulares de 5 minutos, foram retiradas amostras para os testes de compressão durante um período de 30 minutos.

Depois do tratamento térmico, procedeu-se à compressão uniaxial, entre duas placas paralelas, dos grãos na posição de repouso, a uma taxa de aplicação de força de $0,001 \text{ m s}^{-1}$. Para cada condição experimental, foram utilizados dez grãos de feijão, sendo o teste finalizado com a deformação fixa de $0,004 \text{ m}$, com a obtenção da respectiva força neste ponto, adaptadas da deformação utilizada por Ribeiro et al. (2005).

Para a análise desta etapa do experimento, considerou-se o esquema em parcela subdividida, tendo nas parcelas os níveis de infestação (presença e ausência de insetos) e os diferentes tempos do tratamento térmico (0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 min) e nas subparcelas o tempo de armazenamento (0, 28, 56, 84 e 112 dia), no delineamento inteiramente casualizado, com dez repetições.

6.2.2.4 Teste de punção durante a embebição do produto em diferentes temperaturas

Para realização do teste de punção, foram utilizados os grãos de feijão depois da embebição durante 12 horas nas temperaturas de 20, 30, 40 e $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

O teste de punção foi realizado em uma Máquina Universal de Testes com a célula de carga de 500 N, utilizando-se o acessório “multiple pea test rug” que compreende dezoito hastes metálicas com comprimento de $0,018 \text{ m}$ e diâmetro de $0,002 \text{ m}$ cada uma. A velocidade de deslocamento da barra foi de $1,67 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$, de acordo com Del Valle et al. (1992), obtendo-se a força máxima de punção.

O experimento foi montado segundo o esquema em parcela subdividida, tendo nas parcelas os níveis de infestação (presença e ausência de insetos) e as temperaturas de embebição (20, 30, 40 e $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$) e nas sub parcelas o tempo de armazenamento (0, 28, 56, 84 e 112 dia), no delineamento inteiramente casualizado, com três repetições.

6.2.2.5 Teste de punção durante a cocção do produto

Para realização do teste de punção durante a cocção do produto, foram utilizadas as amostras preparadas para o teste de compressão descrito no item 6.2.2.3.

O teste de punção foi realizado em uma Máquina Universal de Testes com metodologia descrita no item 6.2.2.4.

Foi utilizado o esquema em parcela subdividida, tendo nas parcelas os níveis de infestação (presença e ausência de insetos) e os diferentes tempos do tratamento térmico (0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minuto) e nas subparcelas o tempo de armazenamento (0, 28, 56, 84 e 112 dia), no delineamento inteiramente casualizado, com três repetições.

6.2.3 Análises estatísticas

Os dados foram analisados por meio de análise de variância e regressão. Para o fator qualitativo, as médias foram comparadas utilizando-se o teste de Tukey, adotando-se o nível de 5% de probabilidade. Para o fator quantitativo, os modelos foram escolhidos com base na significância da equação, pelo teste F, coeficiente de determinação (R^2) e do conhecimento da evolução do fenômeno biológico.

6.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.3.1 Teste de compressão durante a secagem

No Quadro 1, são apresentados os valores médios dos raios de curvatura dos grãos de feijão para cada posição e teor de água, utilizados nos cálculos para determinação do módulo proporcional de deformidade. Verifica-se que os raios de curvatura oscilaram com o teor de água do produto, mas sem a ocorrência de uma tendência clara em função desta variável. Os raios de curvatura apresentaram valores distintos para cada posição de compressão do grão, decrescendo de acordo com a seqüência: posição de repouso, força aplicada sobre o hilo e força aplicada com o hilo na posição vertical.

QUADRO 1. Valores médios dos raios de curvatura dos grãos de feijão ($\times 10^{-3}$ m) para cada posição e teor de água (b.s.)

Teor de água (decimal, b.s.)	Posição					
	P ₁		P ₂		P ₃	
	r	R	r	R	r	R
0,423	4,39	8,49	1,99	7,44	1,39	2,45
0,370	4,50	8,64	1,97	7,33	1,29	2,51
0,311	4,31	8,51	1,93	7,37	1,29	2,55
0,258	4,43	9,28	1,98	7,69	1,26	2,49
0,208	4,05	8,78	1,98	7,73	1,37	2,52
0,166	4,07	9,05	2,02	7,18	1,38	2,46
0,136	4,04	8,58	2,15	7,39	1,43	2,43

A Figura 4 mostra as curvas de força em função da deformação para o teor de água de 0,42 (b.s.), nas três posições de compressão (P₁, P₂ e P₃). Verifica-se que a posição natural de repouso (P₁) oferece maior resistência à compressão em virtude de a mesma ocorrer paralelamente aos cotilédones e por apresentar maior área de contato entre a placa de

compressão e os grãos, justificando-se pelos maiores valores dos raios de curvatura. A aplicação de força na posição sobre o hilo (P_2) apresentou resistência intermediária. Finalmente, a compressão na posição de aplicação de força com o hilo na vertical (P_3) apresentou menores resistências e maiores deformações ao longo do teste. Este comportamento também foi observado para os demais teores de água utilizados no presente trabalho.

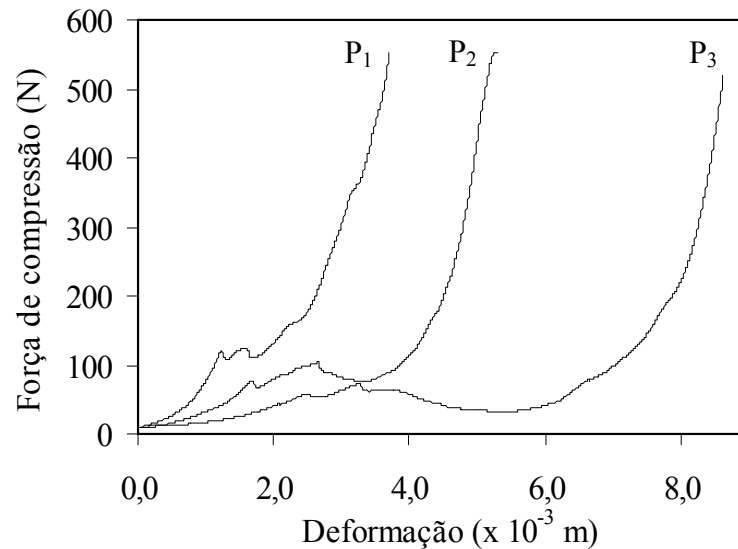


FIGURA 4. Curvas de força em função da deformação para o teor de água de 0,42 (b.s.), nas três posições de compressão (P_1 , P_2 e P_3).

Nas Figuras 5, 6 e 7, encontram-se os valores médios da força máxima de compressão nas três posições de compressão (P_1 , P_2 e P_3), em função do teor de água (decimal b.s.), para as diversas deformações.

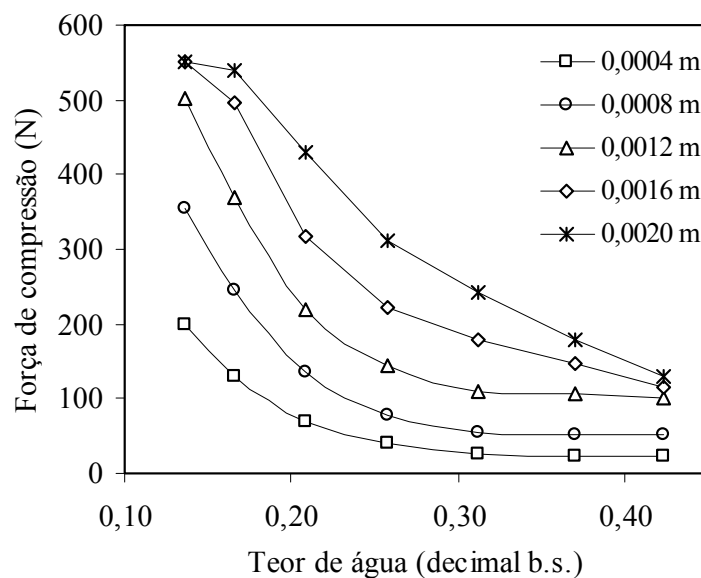


FIGURA 5. Valores médios da força máxima de compressão (N) na posição de compressão em repouso (P_1), em função do teor de água (decimal b.s.), para as deformações de 0,0004; 0,0008; 0,0012; 0,0016 e 0,002 m.

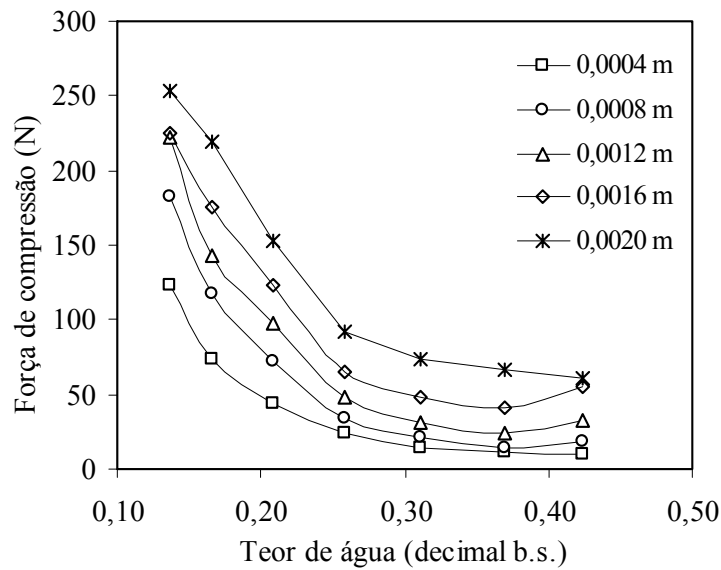


FIGURA 6. Valores médios da força máxima de compressão (N) na posição de compressão com o hilo na horizontal (P_2), em função do teor de água (decimal b.s.), para as deformações de 0,0004; 0,0008; 0,0012; 0,0016 e 0,002 m.

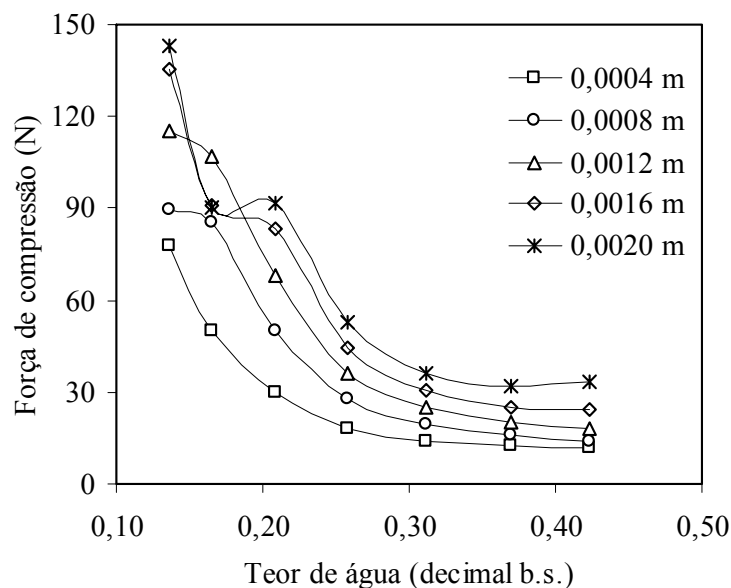


FIGURA 7. Valores médios da força máxima de compressão (N) na posição de compressão com o hilo na posição vertical (P_3), em função do teor de água (decimal b.s.), para as deformações de 0,0004; 0,0008; 0,0012; 0,0016 e 0,002 m.

Analisando as Figuras 5, 6 e 7, verifica-se que a força de compressão necessária para deformar o feijão diminuiu com o aumento do teor de água para as três posições de compressão. Resultados semelhantes foram observados por Henry et al. (2000a) e Ribeiro et al. (2005) para grãos de soja com diferentes teores de água. A força média necessária para as diversas deformações em função do teor de água variou entre 22,3 e 551,7 N; 10,5 e 253,1 N

e 11,6 e 143 N, para as posições P₁, P₂ e P₃, respectivamente. Os grãos com teores de água mais elevados oferecem menor resistência à compressão, aumentando proporcionalmente com a redução do teor de água. Esta tendência deve-se, possivelmente, a uma mudança gradual na integridade da matriz celular com a redução do teor de água (Gupta e Das, 2000).

Como era esperado, com o aumento da deformação do produto, obteve-se uma sensível elevação da força, independentemente da posição de compressão dos grãos.

Observam-se, ainda nestas figuras, diferenças entre as três posições de compressão (espessura, largura e comprimento) dos grãos, sendo os maiores valores da força de compressão observados para a posição P₁. Este fato deve-se, possivelmente, ao surgimento de tensões cisalhantes nos tecidos internos, que, dependendo da direção do esforço aplicado, requer uma força diferenciada para deformar o grão. As deformações causam ruptura dos cotilédones que apresentam, inicialmente, uma organização celular definida (Peterson et al., 1995).

A partir dos dados de força de compressão, foram obtidos os módulos proporcionais de deformidade, os quais apresentaram o mesmo comportamento da força de compressão em função do teor de água.

Verificou-se, para os testes empregados, que existem diferenças significativas para os fatores analisados, assim como para as interações entre os teores de água, as deformações e as posições de compressão.

No Quadro 2, são apresentadas as equações de regressão ajustadas aos valores experimentais do módulo proporcional de deformidade do feijão em função do teor de água e da deformação, para cada posição de compressão. Pela análise dos resultados, observa-se que as equações ajustadas se mostraram satisfatórias, apresentando altos valores do coeficiente de determinação (R²).

QUADRO 2. Equações ajustadas aos valores experimentais do módulo proporcional de deformidade do feijão (E_p) em função do teor de água (U) e da deformação (D), para cada posição de compressão

Posição	Modelo	R ²
P ₁	$E_p = 1,32 \cdot 10^9 - 5,68 \cdot 10^9 \cdot U + 4,57 \cdot 10^{11} \cdot D + 6,63 \cdot 10^9 \cdot U^2 + 6,63 \cdot 10^{13} \cdot D^2 - 7,96 \cdot 10^{11} \cdot U \cdot D$	0,969*
P ₂	$E_p = 1,05 \cdot 10^9 - 4,17 \cdot 10^9 \cdot U - 5,07 \cdot 10^{11} \cdot D + 4,40 \cdot 10^9 \cdot U^2 + 8,29 \cdot 10^{13} \cdot D^2 + 8,34 \cdot 10^{11} \cdot U \cdot D$	0,956*
P ₃	$E_p = 8,53 \cdot 10^8 - 3,11 \cdot 10^9 \cdot U - 4,50 \cdot 10^{11} \cdot D + 3,28 \cdot 10^9 \cdot U^2 + 8,36 \cdot 10^{13} \cdot D^2 + 6,01 \cdot 10^{11} \cdot U \cdot D$	0,953*

*Significativo a 5% pelo teste F.

em que:

E_p : módulo proporcional de deformidade, Pa;

U: teor de água, decimal b.s.; e

D: deformação, m.

Nas Figuras 8, 9 e 10, são apresentadas as superfícies de resposta, ajustadas de acordo com as equações listadas anteriormente, para o módulo proporcional de deformidade do feijão em função do teor de água e da deformação, para cada posição de compressão. O valor elevado do módulo de deformidade significa que uma força maior deve ser aplicada ao produto para obter uma determinada deformação (Batista et al., 2003). Observa-se que, independentemente da posição de compressão, os valores do módulo proporcional de deformidade aumentam com a redução do teor de água. Estes resultados corroboram aqueles observados por Ribeiro et al. (2005) para soja e Batista et al. (2003) para os frutos de café.

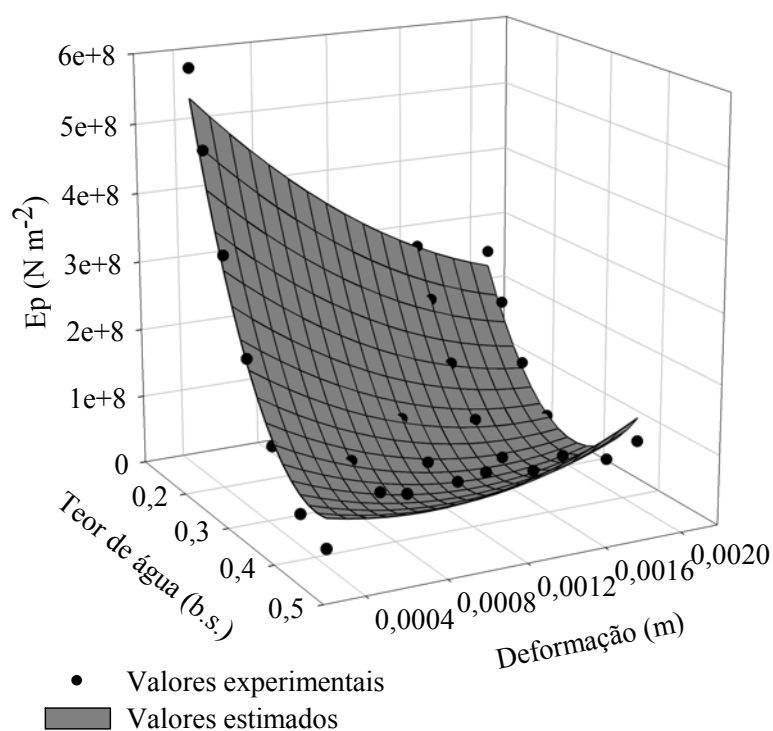


FIGURA 8. Valores médios do módulo proporcional de deformidade do feijão (Pa) na posição de compressão em repouso (P_1), em função do teor de água (decimal b.s.) e da deformação.

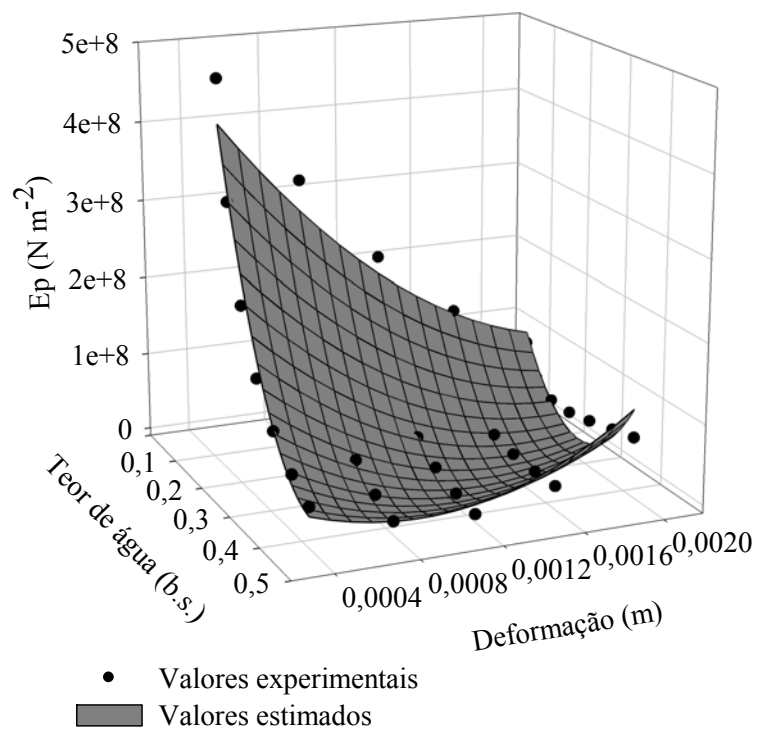


FIGURA 9. Valores médios do módulo proporcional de deformidade do feijão (Pa) na posição de compressão com o hilo na horizontal (P_2), em função do teor de água (decimal b.s.) e da deformação.

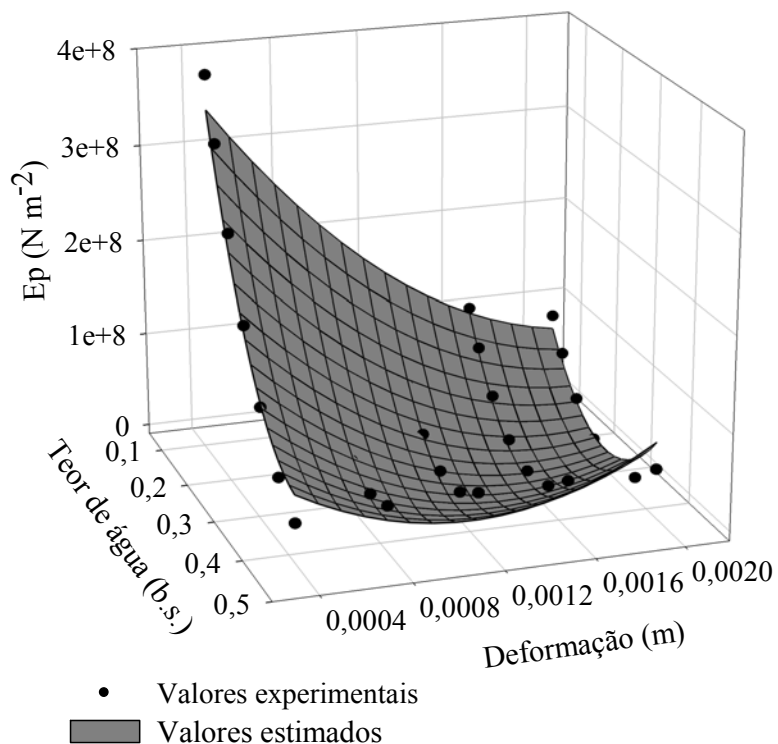


FIGURA 10. Valores médios do módulo proporcional de deformidade do feijão (Pa) na posição de compressão com o hilo na vertical (P_3), em função do teor de água (decimal b.s.) e da deformação.

Para a faixa de teor de água estudado, os valores do módulo proporcional de deformidade variaram de $4,1 \times 10^7$ a $71,3 \times 10^7$ Pa para a posição P₁; de $2,6 \times 10^7$ a $56,4 \times 10^7$ Pa para a posição P₂; e de $1,7 \times 10^7$ a $48,7 \times 10^7$ Pa para a posição P₃. Estes valores estão coerentes com os observados por Ribeiro et al. (2005) para grãos de soja, que obtiveram o módulo proporcional de deformidade de $2,31 \times 10^7$ a $10,7 \times 10^7$ Pa para P₁; de $1,68 \times 10^7$ a $5,42 \times 10^7$ Pa para P₂; e de $1,02 \times 10^7$ a $5,43 \times 10^7$ Pa para P₃, para a faixa de teor de água de 0,58 a 0,10 (decimal b.s.) e deformação do produto de 0,002 m. Couto et al. (2002) relataram que o módulo proporcional de deformidade para o café, com teor de água de aproximadamente 2,5 (decimal b.s.), velocidade de compressão de $1,7 \times 10^{-4}$ m s⁻¹ e na faixa deformação de 1×10^{-4} a 6×10^{-4} m, apresentou valores entre $1,0 \times 10^7$ e $3,0 \times 10^7$ Pa para os frutos cereja e de $7,0 \times 10^7$ a $15,0 \times 10^7$ Pa para os frutos verdes. Batista et al. (2003) verificaram que o módulo proporcional de deformidade de frutos de café, para a faixa de teor de água de 1,50 a 0,14 (decimal b.s.), nos três estádios de maturação, submetidos às temperaturas de secagem de 40, 50 e 60 °C, apresentou valores entre $2,0 \times 10^7$ e $18,0 \times 10^7$ Pa para os frutos de café cereja; de $5,0 \times 10^7$ a $40,0 \times 10^7$ Pa para os frutos verdes; e de $1,0 \times 10^7$ a 50×10^7 Pa para os frutos verdoengos.

Verifica-se ainda, nas Figuras 8, 9 e 10, que, para as três posições de compressão, o módulo proporcional de deformidade aumenta com a redução da deformação do produto. Resultados semelhantes foram observados por Couto et al. (2002) e Batista et al. (2003) para os frutos de café em diferentes estádios de maturação.

No Quadro 3, são apresentados os valores dos coeficientes elásticos “d”, “e”, “f”, para a posição natural de repouso, estimados por meio da Equação 3.

QUADRO 3. Valores dos coeficientes elásticos “d”, “e”, “f”, para cada teor de água dos grãos de feijão comprimidos na posição natural de repouso

Teor de água	d (N/mm)	e (N/mm ²)	f (N/mm ³)
0,423	25,026	80,140	-30,271
0,370	17,165	90,396	-27,210
0,311	29,001	65,298	-9,504
0,258	48,232	73,448	-10,000
0,208	112,411	80,951	-15,500
0,166	260,621	106,259	-50,400
0,136	508,749	-32,978	-41,903

A descrição do modelo indicado por Henry et al. (1996) infere que os sinais dos coeficientes “e” e “f” identificam condições especiais do material e do teste. Para espécies não danificadas, no entanto, o sinal esperado para os coeficientes deverá ser positivo para “e”,

assim como negativo para “f”. Além disso, um valor positivo de “d” é sempre requerido para uma inclinação inicial positiva da curva. De acordo com o Quadro 3, observa-se que estas características foram satisfeitas, exceto para o coeficiente “e” para o teor de água de 0,136 (decimal b.s.), durante o teste de compressão dos grãos de feijão, indicando que os dados experimentais seguem o modelo sigmoidal, descrito por meio da série de Taylor, geralmente identificado para materiais biológicos (Henry et al., 1996). Esta variação no sinal do coeficiente “e”, segundo Henry et al. (2000a), possivelmente, ocorreu devido a efeitos como: (1) deslizamento do grão entre as placas de compressão; (2) grãos apresentando danos físicos não detectáveis ao olho nu; e (3) grãos apresentando teor de água elevado, dificultando, assim, a detecção do ponto de ruptura devido à sua maciez.

No Quadro 4, são apresentados os valores máximos de tangente e secante para a posição natural de repouso e para os diferentes teores de água.

QUADRO 4. Valores máximos da tangente e secante da curva força em função da deformação dos grãos de feijão, comprimidos na posição natural de repouso, para cada teor de água

Teor de água	Tangente máxima (N/mm)	Secante máxima (N/mm)
0,423	95,749	78,068
0,370	117,268	92,242
0,311	178,551	141,163
0,258	228,052	183,097
0,208	253,335	218,104
0,166	335,296	316,627
0,136	517,400	515,237

A tangente e secante máximas foram obtidas para as deformações: $x = -2e/3f$; $x = -e/6f$, respectivamente. Verifica-se um aumento nos valores da tangente e secante máximas com a redução do teor de água. Além disso, os valores da tangente máxima apresentaram maiores magnitudes em relação à secante máxima, para o mesmo teor de água, corroborando os resultados obtidos por Henry et al. (2000a), Pan e Tangratanavalee (2003) e Henry et al. (2000b).

6.3.2 Propriedades mecânicas do feijão ao longo do armazenamento com a presença do inseto-praga

6.3.2.1 Teste de compressão

Na Figura 11, são apresentadas as curvas ilustrativas de força vs deformação para a amostra inicial, nas três posições de compressão (P_1 , P_2 e P_3). Semelhante ao teste de compressão durante a secagem, verifica-se diminuição da resistência à compressão de acordo com a seqüência: posições natural de repouso (P_1), força aplicada sobre o hilo (P_2) e força aplicada com o hilo na posição vertical (P_3), respectivamente. Nota-se que a compressão na posição (P_3) foi interrompida na deformação de aproximadamente $3,0 \times 10^{-3}$ m, devido à ruptura dos cotilédones, impossibilitando o avanço do teste.

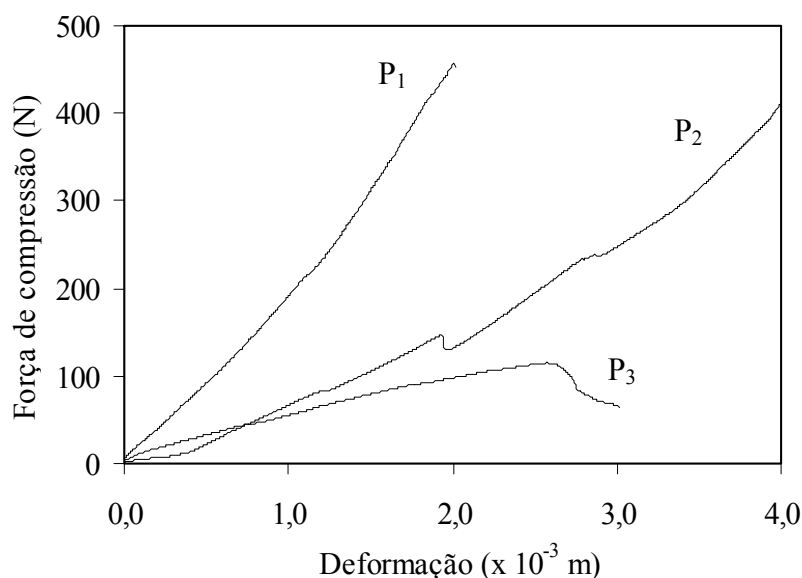


FIGURA 11. Curvas de força vs deformação para a amostra inicial, nas três posições de compressão (P_1 , P_2 e P_3).

De acordo com os resultados obtidos para o teste de compressão do feijão ao longo do armazenamento, identificou-se, para as três posições de compressão (P_1 , P_2 e P_3), o efeito da interação entre os níveis de infestação (presença e ausência de insetos), deformações ($0,4$; $0,8$; $1,2$ e $1,6 \times 10^{-3}$ m) e período de armazenamento (0 , 28 , 56 , 84 e 112 dia). Desta forma, procedeu-se ao desdobramento da força de compressão para cada posição em função da deformação e do período de armazenamento.

No Quadro 5, são apresentadas as equações de regressão ajustadas para os dados de força de compressão em função da deformação e do período de armazenamento para as três posições de compressão dos grãos. Observa-se que as equações ajustadas se mostraram satisfatórias na descrição do fator em estudo, incorporando o efeito da deformação e do

período de armazenamento na determinação da força de compressão, apresentando elevados valores de r^2 e significância a 5% pelo teste F.

QUADRO 5. Equações de regressão ajustadas para a força de compressão (F) em função da deformação (D) e do período de armazenamento (P) e coeficiente de determinação para as respectivas posições

Posição	Tratamento	Modelo	R ²
P ₁	Sem insetos	$F = 61,596 - (1,831 \cdot P) + (1,861 \cdot 10^5 \cdot D) + (0,0126 \cdot P^2) + (1,001 \cdot 10^7 \cdot D^2) + (926,291 \cdot P \cdot D)$	0,9312*
	Com insetos	$F = -68,867 + (4,341 \cdot P) + (2,843 \cdot 10^5 \cdot D) - (0,0387 \cdot P^2) - (4,411 \cdot 10^6 \cdot D^2) - (1,390 \cdot 10^3 \cdot P \cdot D)$	0,9559*
P ₂	Sem insetos	$F = -55,356 + (0,7385 \cdot P) + (1,899 \cdot 10^5 \cdot D) - (0,0043 \cdot P^2) - (4,981 \cdot 10^7 \cdot D^2) + (94,672 \cdot P \cdot D)$	0,9528*
	Com insetos	$F = -47,872 + (1,836 \cdot P) + (1,577 \cdot 10^5 \cdot D) - (0,016 \cdot P^2) - (2,532 \cdot 10^7 \cdot D^2) - (556,643 \cdot P \cdot D)$	0,9291*
P ₃	Sem insetos	$F = -28,467 + (0,924 \cdot P) + (1,477 \cdot 10^5 \cdot D) - (0,0059 \cdot P^2) - (4,794 \cdot 10^7 \cdot D^2) - (188,866 \cdot P \cdot D)$	0,9063*
	Com insetos	$F = -16,847 + (0,672 \cdot P) + (1,171 \cdot 10^5 \cdot D) - (0,0064 \cdot P^2) - (3,551 \cdot 10^7 \cdot D^2) - (208,3242 \cdot P \cdot D)$	0,7263*

* Significativo a 5% pelo teste F.

em que:

F: força de compressão, N;

D: deformação dos grãos, m; e

P: período de armazenamento, dia.

Nas Figuras 12, 13 e 14, são apresentadas as superfícies de resposta, ajustadas de acordo com equações listadas anteriormente, para a força de compressão em função da deformação e do período de armazenamento para as três posições de compressão dos grãos. Analisando os resultados, nota-se, claramente, que a infestação do inseto-praga interfere no comportamento mecânico dos grãos de feijão ao longo do armazenamento, resultando em menores resistências do produto à aplicação de forças. Resultados semelhantes foram verificados por Oliveros-Tascón et al. (2002) que, avaliando a influência do ataque da broca-do-café na firmeza do café em pergaminho, observaram que os grãos sadios foram estatisticamente mais resistentes que os grãos brocados, evidenciando a influência do ataque dos insetos nas propriedades mecânicas do produto.

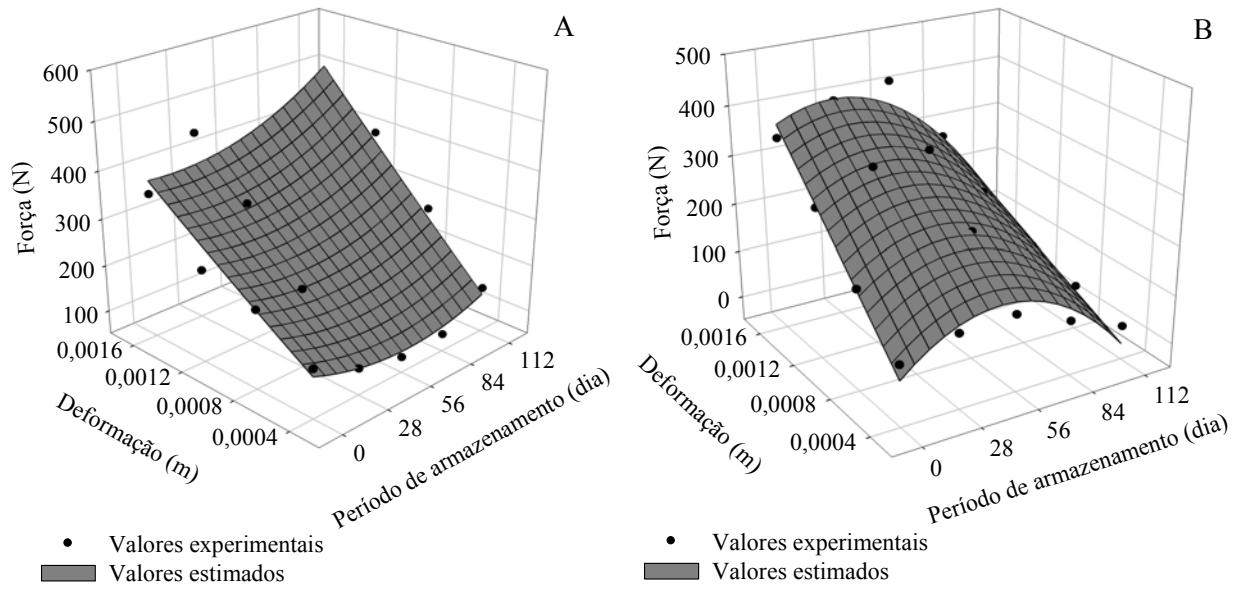


FIGURA 12. Valores experimentais e estimados da força de compressão para o feijão sem (A) e com (B) *A. obtectus*, em função da deformação e do período de armazenamento, para a posição P₁.

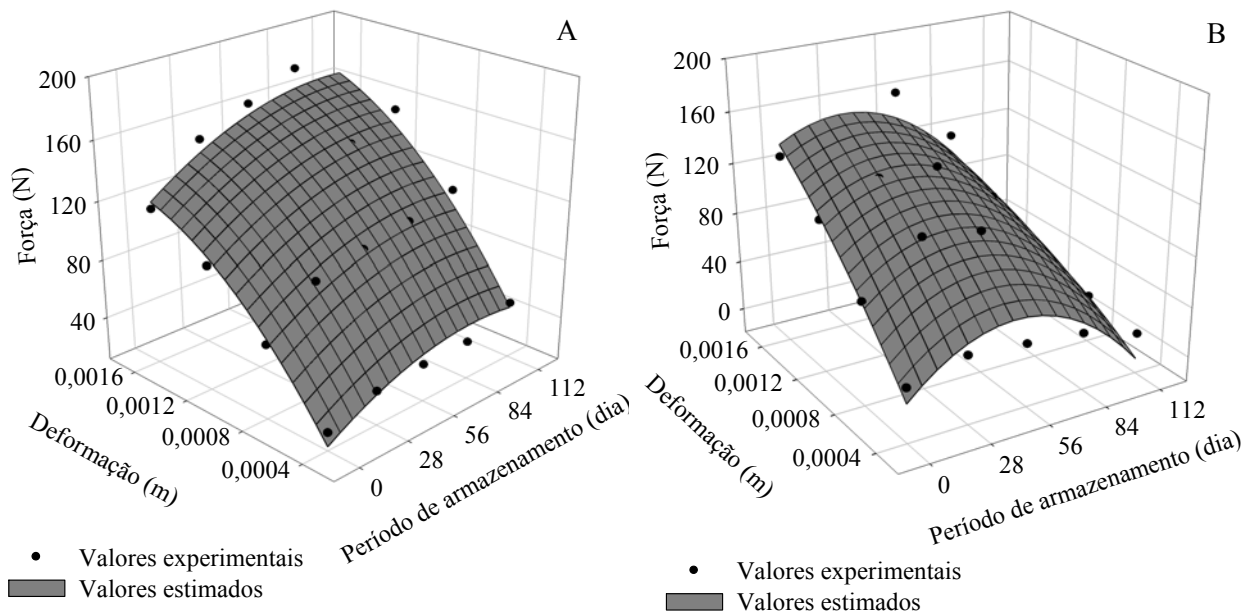


FIGURA 13. Valores experimentais e estimados da força de compressão para o feijão sem (A) e com (B) *A. obtectus*, em função da deformação e do período de armazenamento, para a posição P₂.

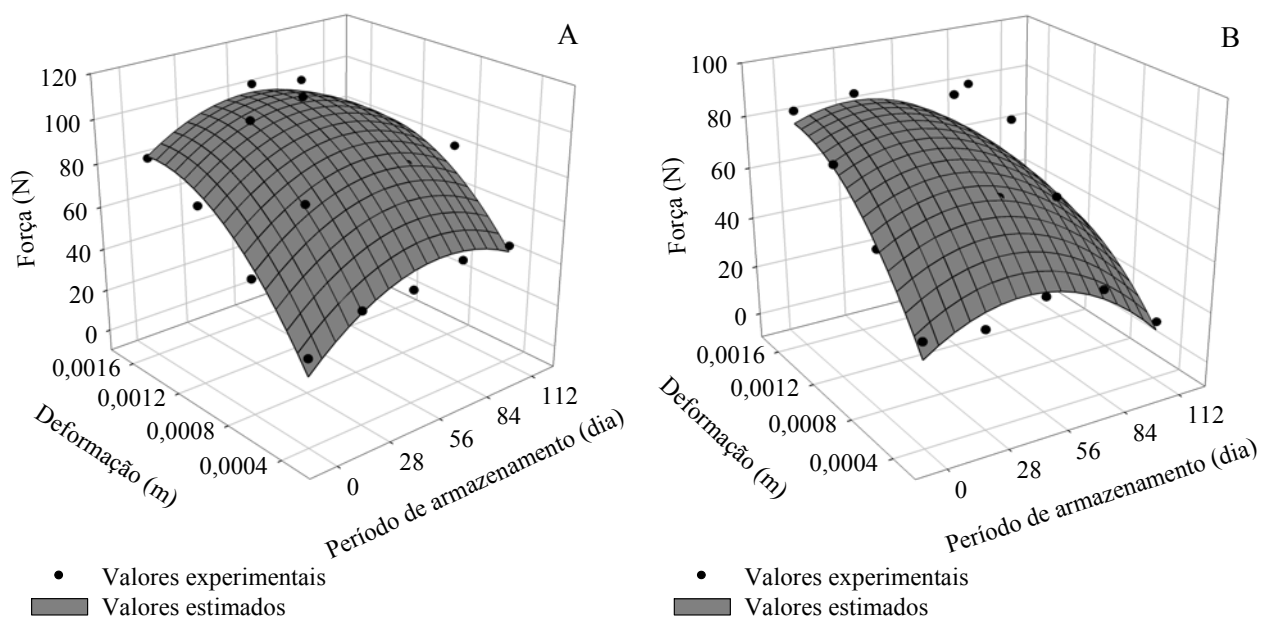


FIGURA 14. Valores experimentais e estimados da força de compressão para o feijão sem (A) e com (B) *A. obtectus*, em função da deformação e do período de armazenamento, para a posição P₃.

Verifica-se ainda, nestas figuras, que a força média necessária para deformar $1,6 \times 10^{-3}$ m para o produto armazenado durante 112 dias com e sem insetos variou de 506,65 a 90,34 N; de 173,6 a 36,5 N; e de 95,3 a 31,5 N para as posições de compressão P₁, P₂ e P₃, respectivamente. Com o armazenamento, observa-se que as forças necessárias à deformação do produto aumentaram, comprovando o endurecimento dos grãos de feijão durante o período. Este fato também foi observado por Cordeiro (2001) que, avaliando a resistência à compressão de grãos de feijão, observou um aumento de 60% na força necessária para a ruptura depois de 90 dias de armazenamento.

6.3.2.2 Teste de compressão durante a embebição do produto em diferentes temperaturas

Na Figura 15, são apresentadas as curvas ilustrativas de força vs deformação para a amostra inicial, nas quatro temperaturas de embebição (20, 30, 40 e 50 °C). Analisando o teste de compressão durante a embebição do produto em diferentes temperaturas, verificou-se efeito das interações entre os níveis de infestação (presença e ausência de insetos) vs tempo de armazenamento (0, 28, 56, 84 e 112 dia) e temperaturas de embebição (20, 30, 40 e 50 °C), em função do tempo de armazenamento (0, 28, 56, 84 e 112 dia), promovendo-se, assim, os respectivos desdobramentos.

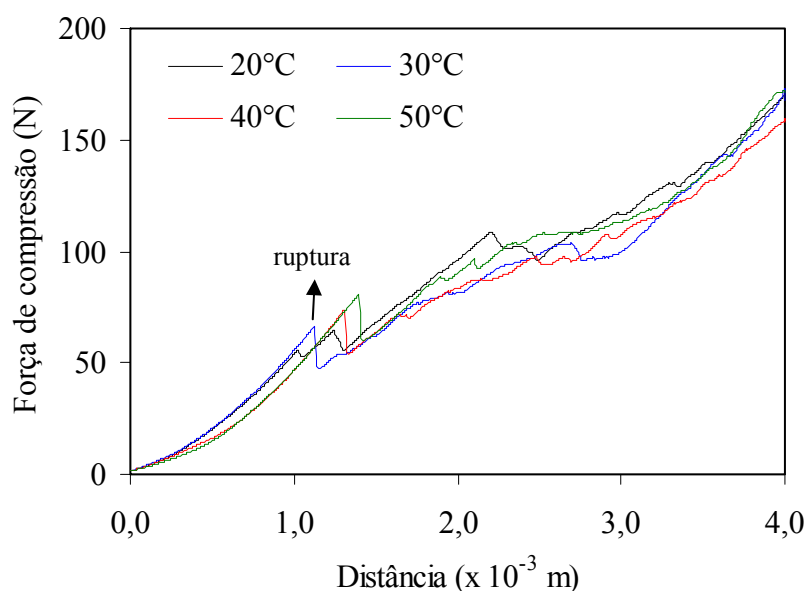


FIGURA 15. Curvas de força vs deformação para a amostra inicial, nas três posições de compressão (P₁, P₂ e P₃).

No Quadro 6, são apresentadas as forças médias para o rompimento do tegumento para o feijão entre a interação das temperaturas de embebição, com e sem infestação de insetos, ao longo dos períodos de armazenamento.

QUADRO 6. Valores médios da força para o rompimento do tegumento (N) dos grãos de feijão, com e sem a infestação de insetos, ao longo do período de armazenamento

Fatores	Período de armazenamento (dia)				
	0	28	56	84	112
Sem insetos	63,10 a	66,59 a	62,83 a	68,13 a	68,32 a
Com insetos	63,10 a	68,86 a	65,50 a	60,94 b	45,26 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Observa-se, no Quadro 6, que aos 84 e 112 dias de armazenamento, a força de ruptura para os grãos infestados por insetos foi significativamente inferior à testemunha. Estes resultados comprovam o efeito depreciativo dos insetos na alteração da estrutura física dos grãos de feijão ao longo do armazenamento.

No Quadro 7, são apresentadas as equações de regressão para o desdobramento da interação entre as temperaturas analisadas (20, 30, 40 e 50 °C) ao longo dos períodos de armazenamento.

QUADRO 7. Equações de regressão para a representação da força de rompimento do tegumento (F, N) do feijão, em função da temperatura de embebição (T, °C), para os diversos períodos de armazenamento e respectivos coeficientes de determinação

Período (dia)	Equação	R ²
0	$F = 48,639 + 0,4321^+ \cdot T$	0,8716*
28	$F = 45,849 + 0,6324^+ \cdot T$	0,8648*
56	$F = 50,301 + e^{(0,0697^+ \cdot T)}$	0,8804*
84	$F = 41,776 + 0,6297^+ \cdot T$	0,8805*
112	$F = 39,81 + 0,4252^+ \cdot T$	0,9335*

⁺Significativo a 5% pelo teste t.

* Significativo a 5% pelo teste F.

Analisando o Quadro 7, nota-se que a força necessária ao rompimento do tegumento dos grãos de feijão aumenta linearmente em função da temperatura de embebição para os períodos de 0, 28, 84 e 112 dias de armazenamento. Para os testes realizados aos 56 dias de armazenamento, observa-se que o modelo exponencial representa satisfatoriamente os valores experimentais da força de ruptura para a faixa de temperatura de embebição analisada. A faixa de temperatura utilizada para a embebição do feijão (20 a 50 °C) é insuficiente para promover a cocção dos grãos e diminuir a sua resistência. Possivelmente, em temperaturas menores, o tegumento do feijão se apresenta com a estrutura rígida e frágil. O aumento na temperatura de embebição de 20 para 50 °C acelera a difusividade de água da superfície do grão para as camadas interiores, promovendo o aumento do coeficiente de difusão e, conseqüentemente, da hidratação do produto. Desta forma, a elasticidade do produto é aumentada, exigindo uma força maior para romper a estrutura do tegumento.

6.3.2.3 Teste de compressão durante a cocção do produto

Na Figura 16, são apresentadas as curvas ilustrativas de força vs deformação para a amostra inicial, nos diversos tempos de cocção (0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minuto). Os demais períodos de armazenamento apresentaram comportamento semelhante ao descrito nesta figura.

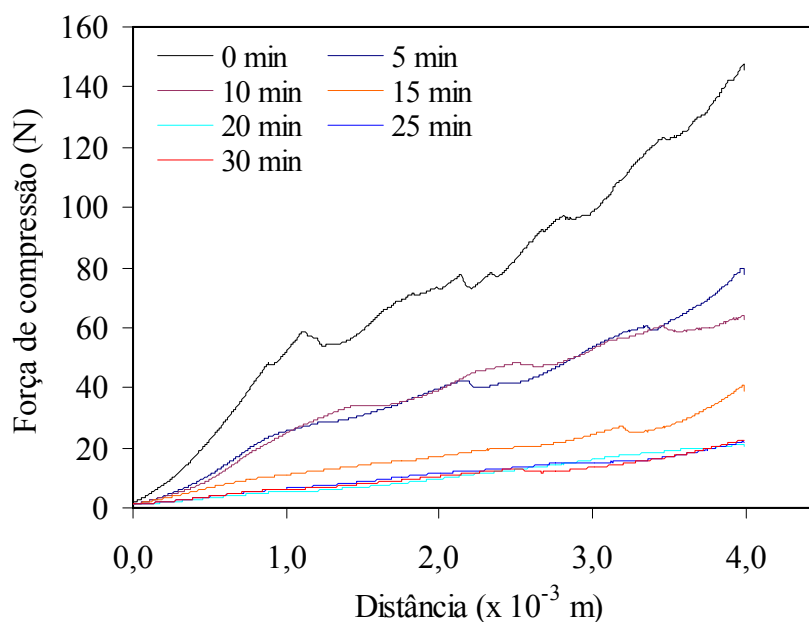


FIGURA 16. Curvas de força vs deformação para a amostra inicial, nos diversos tempos de cocção.

De acordo com a Figura 16, observa-se que, como era esperado, o aumento do tempo de cocção promoveu uma diminuição da resistência à compressão dos grãos de feijão, devido, principalmente, à desestruturação das membranas celulares e às transformações químicas provenientes do tratamento térmico de cocção.

Para o teste de compressão durante a cocção do produto, a interação entre os fatores analisados (infestação do produto, período de armazenamento e tempo de cocção) foi significativa. Assim, procedeu-se ao desdobramento da força de compressão em função do tempo de cocção e do período de armazenamento.

No Quadro 8, são apresentadas as equações de regressão ajustadas para os dados de força de compressão em função do tempo de cocção e do período de armazenamento para os respectivos tratamentos.

QUADRO 8. Equações de regressão ajustadas para a força de compressão (F) em função do tempo de cocção (Tc) e do período de armazenamento (P), para os respectivos tratamentos e coeficientes de determinação

Tratamento	Modelo	R ²
Sem insetos	$F=137,733 + (0,5356 \cdot P) - (8,355 \cdot Tc) - (0,0035 \cdot P^2) + (0,1652 \cdot Tc^2) - (0,0011 \cdot P \cdot Tc)$	0,9045*
Com insetos	$F=139,691 + (0,1669 \cdot P) - (7,681 \cdot Tc) - (0,0024 \cdot P^2) + (0,1331 \cdot Tc^2) - (0,0114 \cdot P \cdot Tc)$	0,8717*

* Significativo a 5% pelo teste F.

em que:

F: força de compressão, N;

Tc: tempo de cocção, minuto; e

P: período de armazenamento, dia.

Pela análise dos resultados, observa-se, no Quadro 8, que as equações ajustadas se mostraram satisfatórias na descrição do fator em estudo, incorporando o efeito do tempo de cocção e do período de armazenamento na determinação da força de compressão.

Na Figura 17, são apresentadas as superfícies de resposta, ajustadas de acordo com as equações anteriores, para a força de compressão do feijão em função do tempo de cocção e do período de armazenamento, com e sem a presença de insetos. Observa-se que os valores da força de compressão diminuíram com a elevação do tempo de cocção para ambos os tratamentos analisados. Em relação ao período de armazenamento, nota-se que, para um mesmo tempo de cocção, a força de compressão não seguiu uma tendência clara, apresentando oscilações ao longo do período.

De acordo com a Figura 17, a força média de compressão necessária para deformar os grãos em 0,004 m, para o produto armazenado durante 112 dias com e sem insetos, apresentou magnitudes entre 33,5 e 162,2 N para o tempo de cocção variando entre 0 e 30 minutos, respectivamente.

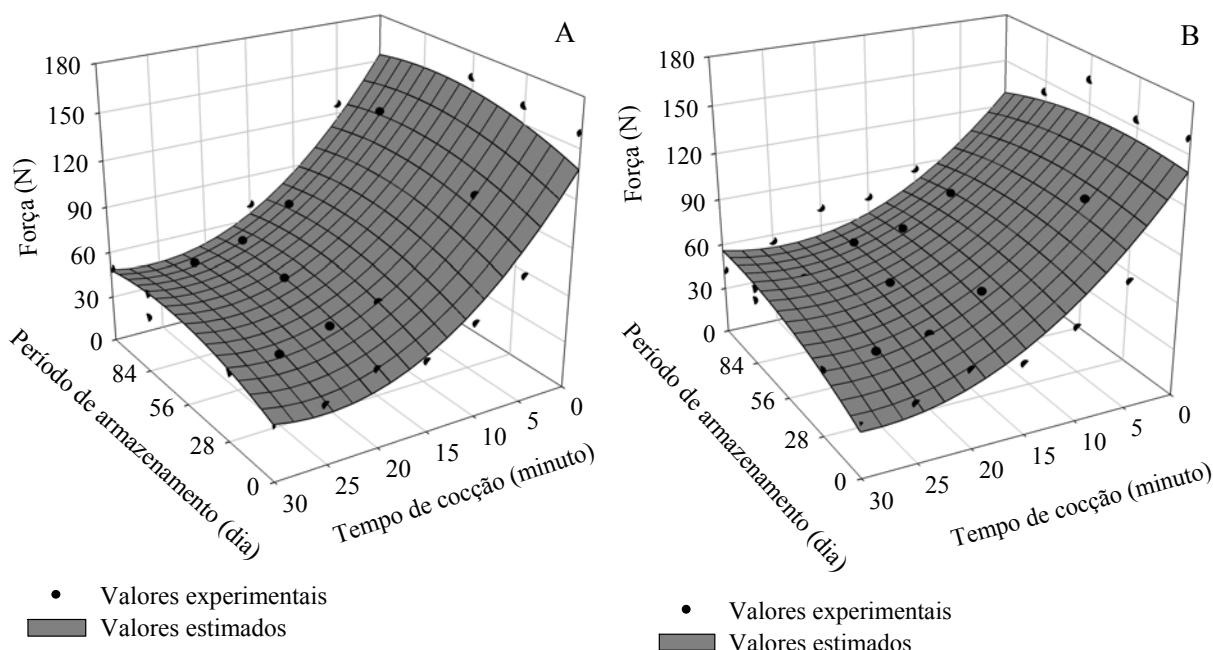


FIGURA 17. Valores experimentais e estimados da força de compressão (N) em função do tempo de cocção (minuto) e do período de armazenamento (dia), para o feijão sem (A) e com (B) *A. obtectus*.

6.3.2.4 Teste de punção durante a embebição do produto em diferentes temperaturas

Na Figura 18, são apresentadas as curvas ilustrativas do teste de punção para a amostra inicial, nas temperaturas de embebição de 20, 30, 40 e 50 °C.

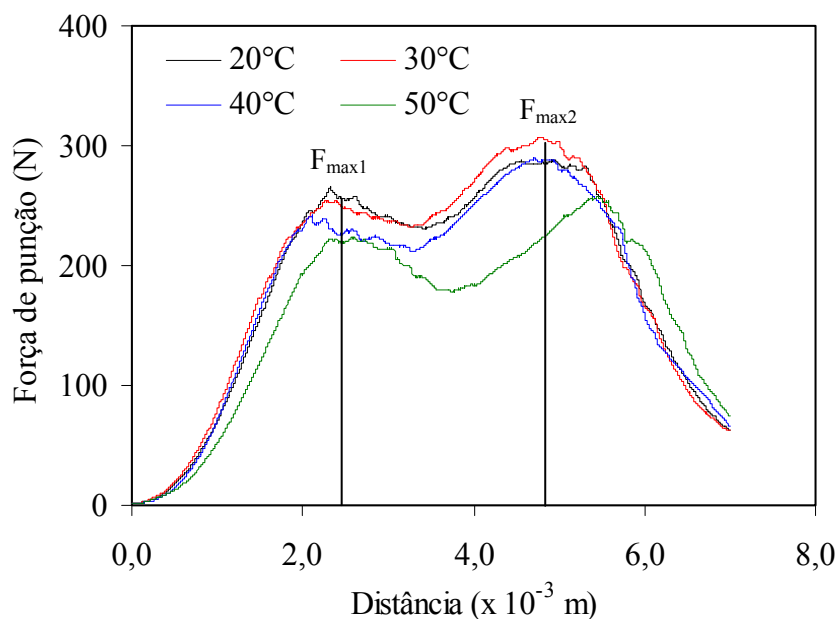


FIGURA 18. Curvas ilustrativas do teste de punção indicando as forças máximas de punção (F_{max}) para a amostra inicial, nas temperaturas de embebição de 20, 30, 40 e 50 °C.

O teste de punção foi realizado com o grão de feijão na posição natural de repouso, ou seja, com os cotilédones situados paralelamente ao probe utilizado na punção. Nota-se, na Figura 18, que, durante a penetração no cotilédone superior do grão, a força de punção aumenta até atingir o primeiro ponto máximo (F_{max1}), diminuindo após a sua perfuração. Quando a agulha atinge o segundo cotilédone, ocorre novamente o incremento na força de punção até a obtenção do segundo ponto máximo (F_{max2}). A partir deste segundo ponto máximo, a resistência do grão à penetração diminui, resultando em menores forças de punção. Para realização das análises, considerou-se a força máxima de punção como sendo a média entre os dois picos (F_{max1} e F_{max2}).

Para os testes empregados, verificou-se que existem diferenças significativas para os fatores analisados, assim como para a interação entre os níveis de infestação (presença e ausência de insetos), temperaturas de embebição (20, 30, 40 e 50 °C) e o período de armazenamento (0, 28, 56, 84 e 112 dia).

No Quadro 9, são apresentadas as equações de regressão ajustadas aos valores experimentais da força máxima de punção do feijão, com e sem a infestação de insetos, em função das temperaturas de embebição e do período de armazenamento.

QUADRO 9. Equações ajustadas aos valores experimentais da força máxima de punção do feijão, com e sem a infestação de insetos, em função das temperaturas de embebição e do período de armazenamento, e respectivos coeficientes de determinação

Tratamento	Modelo	R ²
Sem insetos	$F_m = 262,817 - (0,6313 \cdot P) + (1,4582 \cdot T) + (0,0034 \cdot P^2) - (0,0338 \cdot T^2) + (0,0038 \cdot P \cdot T)$	0,6103*
Com insetos	$F_m = 262,934 - (0,2876 \cdot P) + (1,8849 \cdot T) - (0,0097 \cdot P^2) - (0,0473 \cdot T^2) + (0,014 \cdot P \cdot T)$	0,9061*

Na Figura 19, estão apresentadas as superfícies de resposta, ajustadas de acordo com as referidas equações, para a força máxima de punção do feijão, com e sem a infestação de insetos, em função das temperaturas de embebição e do período de armazenamento. Verifica-se que os danos causados pelos insetos foram intensificados drasticamente ao final do período de armazenamento, com a infestação generalizada do produto refletindo em menores forças máximas de punção.

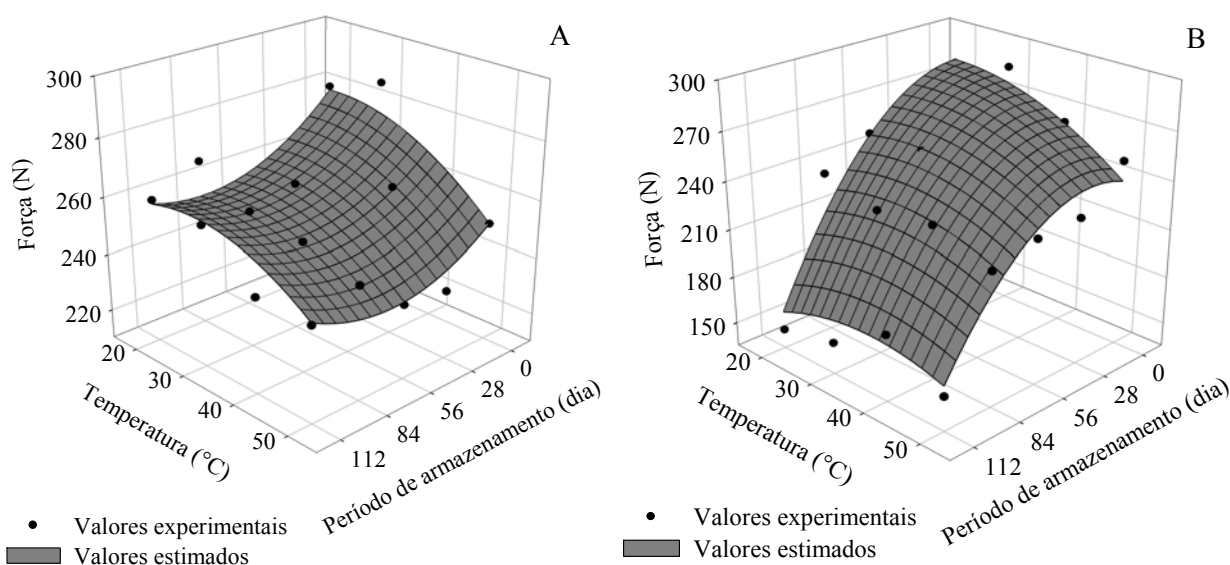


FIGURA 19. Valores experimentais e estimados da força máxima de punção (N) em função temperatura de embebição (°C) e do período de armazenamento (dia), para o feijão sem (A) e com (B) *A. obtectus*.

De acordo com a Figura 19, percebe-se que as forças máximas de punção, para o feijão armazenado ao longo de 112 dias, variaram entre 71,5 e 131,2 N; 72,3 e 133,7 N; 80,8 e 123,5 N; e entre 75,6 e 118,3 N, para as temperaturas de embebição de 20, 30, 40 e 50 °C, respectivamente.

6.3.2.5 Teste de punção durante a cocção do produto

Na Figura 20, são apresentadas as curvas ilustrativas do teste de punção para a amostra inicial, durante os tratamentos térmicos de 0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos.

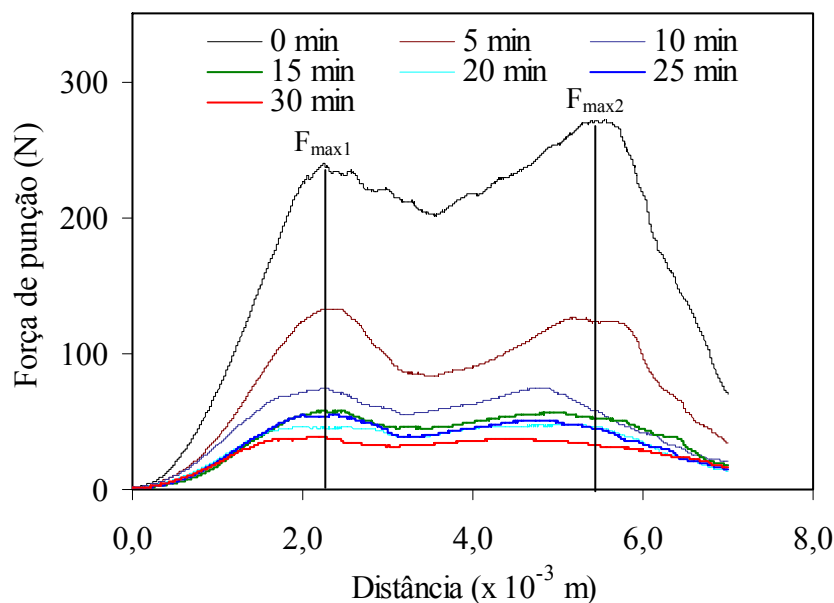


FIGURA 20. Curvas ilustrativas do teste de punção indicando as forças máximas de punção (F_{max}) para a amostra inicial, nos diversos tempos de cocção.

De modo semelhante ao teste de punção durante a embebição do produto em diferentes temperaturas (item 6.3.2.4), as análises foram realizadas considerando a força máxima de punção média (F_{max1} e F_{max2}). Para os testes empregados, verificou-se que existem diferenças significativas para os fatores analisados, assim como para a interação entre os níveis de infestação (presença e ausência de insetos), os tempos do tratamento térmico (0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minuto) e o período de armazenamento (0, 28, 56, 84 e 112 dia).

No Quadro 10, são apresentadas as equações de regressão que foram ajustadas satisfatoriamente aos valores experimentais da força máxima de punção do feijão, com e sem a infestação de insetos, em função dos tempos do tratamento térmico e do período de armazenamento.

QUADRO 10. Equações ajustadas aos valores experimentais da força máxima de punção do feijão, com e sem a infestação de insetos, em função dos tempos do tratamento térmico e do período de armazenamento, e respectivos coeficientes de determinação

Tratamento	Modelo	R ²
Sem insetos	$F_m = 224,644 + (0,2356 \cdot P) - (16,9687 \cdot T_c) - (0,0004 \cdot P^2) + (0,3701 \cdot T_c^2) - (0,0010 \cdot P \cdot T_c)$	0,9221*
Com insetos	$F_m = 227,785 + (0,0922 \cdot P) - (16,0213 \cdot T_c) - (0,0056 \cdot P^2) + (0,317 \cdot T_c^2) + (0,0236 \cdot P \cdot T_c)$	0,8973*

em que:

F_m: força máxima de punção, N;

T_c: tempo de cocção, minuto;

P: período de armazenamento, dia.

Na Figura 21, são apresentadas as superfícies de resposta, ajustadas de acordo com as equações listadas anteriormente, para a força máxima de punção do feijão, com e sem a infestação de insetos, em função dos tempos do tratamento térmico e do período de armazenamento. Observa-se que, com o aumento do tempo de cocção, ocorreu diminuição da resistência à punção dos grãos de feijão, sendo intensificada no produto infestado por insetos.

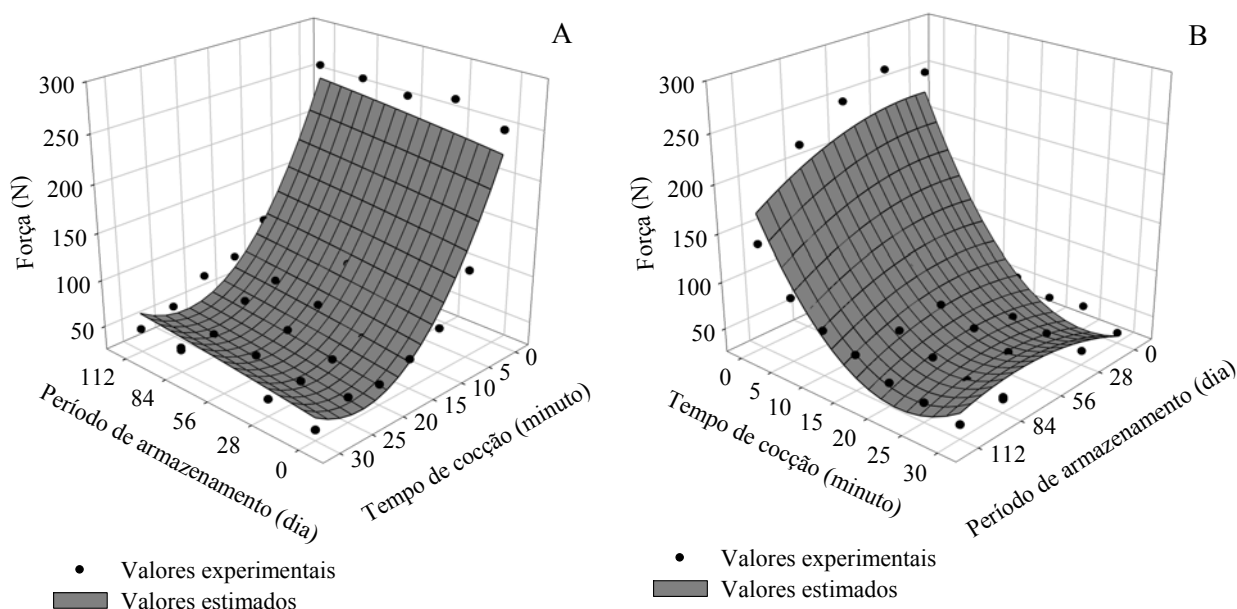


FIGURA 21. Valores experimentais e estimados da força máxima de punção (N) em função do tempo de cocção (minuto) e do período de armazenamento (dia), para o feijão sem (A) e com (B) *A. obtectus*.

Verifica-se ainda na Figura 21A, que a força máxima de punção nos diversos períodos de armazenagem para o produto sem infestação de insetos, variou entre 265,2 e 36,3 N, para o tempo de cocção variando de 0 a 30 minutos, respectivamente. Na Figura 21B, nota-se que a força máxima de punção para os grãos infestados por insetos permaneceu entre 265,9 e 39,4 N durante a cocção do produto entre 0 e 30 minutos, respectivamente.

6.4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que:

- a força de compressão necessária para deformar o feijão diminui com o aumento do teor de água, independentemente da posição de compressão, apresentando, para as diversas deformações, valores entre 22,3 e 551,7 N para a posição de repouso; 10,5 e 253,1 N para a compressão com o hilo na horizontal; e entre 11,6 e 143 N para a compressão com o hilo na posição vertical;

- o módulo proporcional de deformidade aumenta com a redução do teor de água e a deformação do produto, obtendo-se valores, para a faixa de teor de água estudado, entre 4,1 e $71,3 \times 10^7$ Pa, dependendo da posição do grão ao ser comprimido;

- os grãos de feijão apresentam maior resistência à compressão quando submetidos a esforços na posição natural de repouso;

- a infestação pelo inseto-praga, ao longo do armazenamento, interfere no comportamento mecânico dos grãos de feijão, resultando em menores resistências do produto à aplicação de forças;

- o aumento da temperatura de embebição promove o acréscimo da elasticidade do tegumento dos grãos de feijão, proporcionando maior força para sua ruptura;

- com o aumento do tempo de cocção, ocorre a diminuição da resistência à compressão e da força máxima de punção dos grãos de feijão;

- os insetos deterioram os grãos de feijão, refletindo em menores forças máximas de punção; e

- o modelo sigmoidal, descrito por meio da série de Taylor, representa adequadamente a resistência dos grãos de feijão à compressão na posição natural de repouso, para os diversos teores de água analisados.

CONCLUSÕES GERAIS

De acordo com os resultados obtidos pode-se concluir que:

- o teor de água de equilíbrio higroscópico do feijão é diretamente proporcional à atividade de água e decresce com o aumento de temperatura para uma mesma atividade de água, seguindo a mesma tendência da maioria dos produtos agrícolas já estudados;

- baseando-se em parâmetros estatísticos, o modelo de Halsey Modificado é o que melhor representa a higroscopicidade dos grãos de feijão do grupo vermelho, quando comparado aos modelos tradicionalmente utilizados para descrição deste fenômeno;

- com a redução do teor de água, ocorre aumento da energia necessária para a remoção de água do produto, sendo que os valores do calor isostérico integral de dessecção para os grãos de feijão, na faixa de teor de água estudado, variam entre 2.718 a 3.961 kJ kg⁻¹;

- a redução do teor de água influencia as propriedades físicas dos grãos de feijão, proporcionando diminuição da massa de 1000 grãos e da porosidade e aumento das massas específicas aparente e unitária;

- o modelo de regressão linear simples representa satisfatoriamente as propriedades físicas dos grãos de feijão analisadas, em função do teor de água;

- os valores das massas específicas unitária e aparente obtidos em função da composição química do produto foram superiores aos dados experimentais até o teor de água de 0,22 (decimal b.s.); acima deste limite, os valores das massas específicas foram subestimados, evidenciando a limitação de uso desta metodologia;

- a redução do teor de água influencia a contração volumétrica unitária e a massa dos grãos de feijão, provocando a diminuição dos valores em 35,8 e 46,1%, respectivamente, para a faixa de teor de água estudado;

- a forma dos grãos é influenciada pela redução do teor de água, aumentando os valores da esfericidade e das circularidades durante o processo de secagem, para a faixa de teor de água estudado;

- a redução volumétrica dos grãos de feijão variou entre 25 e 37% durante a secagem, sendo função, basicamente, do teor de água final e, praticamente, independente das condições do ar de secagem;

- o modelo de Bala e Woods, dentre aqueles testados, é o que melhor representa o fenômeno da contração volumétrica dos grãos de feijão durante o processo de secagem;

- o tempo necessário para a secagem do feijão até o teor de água de 0,13 (decimal b.s.) foi de 25, 10 e 5,5 horas, para as temperaturas de 35, 45 e 55 °C, respectivamente;

- a umidade relativa do ar não influenciou, significativamente, na taxa de secagem do feijão nas diversas condições analisadas;

- baseando-se em parâmetros estatísticos, os modelos de Page e Midilli, dentre aqueles ajustados, são os que melhor representam o processo de secagem do feijão, tendo sido o tradicional modelo de Page selecionado para descrever a cinética de secagem do feijão em camada fina;

- a relação entre a constante de secagem “k” do modelo de Page e a temperatura do ar pode ser descrita pela equação de Arrhenius, apresentando uma energia de ativação de 14,355 kJ mol⁻¹;

- a contração volumétrica dos grãos introduzida no modelo da difusão líquida melhora a estimativa do coeficiente de difusão durante a secagem do feijão;

- o coeficiente de difusão aumenta com a elevação da temperatura de secagem, apresentando valores entre $2,21 \times 10^{-10}$ e $9,08 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, considerando a contração volumétrica dos grãos, durante a secagem do feijão;

- a relação do coeficiente de difusão com a temperatura de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão líquida do feijão de $32,986 \text{ kJ mol}^{-1}$;

- os grãos de feijão durante a embebição se expandem de maneira diferente nas direções radial e axial, apresentando variações desuniformes em suas dimensões características, maiores para o menor eixo;

- a expansão volumétrica durante a embebição em diferentes temperaturas varia entre 222% e 242%, sendo função, basicamente, do teor de água final;

- baseando-se em parâmetros estatísticos, os modelos de Bala e Woods, Lang e Sokhansanj, Rahman e Linear descrevem adequadamente a expansão volumétrica do feijão;

- a taxa de absorção de água do feijão aumenta com a elevação da temperatura de embebição, sendo o modelo de Peleg recomendado para a descrição da cinética do fenômeno para a faixa de temperatura estudada;

- o coeficiente de difusão, durante a embebição do feijão e considerando a expansão volumétrica dos grãos, apresenta valores de $1,07 \times 10^{-9}$; $1,30 \times 10^{-9}$; $1,58 \times 10^{-9}$ e $1,41 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C, respectivamente;

- a relação entre o coeficiente de difusão e a temperatura pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão líquida nos grãos de feijão de $6,75 \text{ kJ mol}^{-1}$.

- a presença do inseto *Acanthocelides obtectus* causa deterioração intensa do feijão, promovendo redução da massa específica aparente e aumento da condutividade elétrica dos grãos, resultando na alteração da qualidade tecnológica do produto;

- a porosidade intergranular, determinada por meio do picnômetro de comparação a ar, pode ser utilizada como identificador do grau de infestação do produto;

- a cor dos grãos de feijão é influenciada pela presença do inseto-praga, que perfura o produto e expõe a coloração dos cotilédones;

- o tempo de cocção dos grãos de feijão aumenta ao longo do período de armazenamento, independentemente da presença do inseto-praga;

- a temperatura de embebição aumenta a absorção de água dos grãos de feijão, sendo intensificada pela presença do inseto-praga ao longo do período de armazenamento;

- o teor de proteínas do feijão sem a presença do *A. obtectus* não se altera ao longo do armazenamento, porém, a presença de *A. obtectus* nas fases imaturas no interior do produto aumenta o nível de proteínas do feijão;

- a digestibilidade das proteínas dos grãos de feijão não é afetada pela presença do inseto *A. obtectus* e pelo tempo de armazenamento;

- a força de compressão necessária para deformar o feijão diminui com o aumento do teor de água, independentemente da posição de compressão, apresentando, para as diversas deformações, valores entre 22,3 e 551,7 N para a posição de repouso; 10,5 e 253,1 N para a compressão com o hilo na horizontal; e entre 11,6 e 143 N para a compressão com o hilo na posição vertical;

- o módulo proporcional de deformidade aumenta com a redução do teor de água e a deformação do produto, obtendo-se valores, para a faixa de teor de água estudado, entre 4,1 e $71,3 \times 10^7$ Pa, dependendo da posição do grão ao ser comprimido;

- os grãos de feijão apresentam maior resistência à compressão quando submetidos a esforços na posição natural de repouso;

- a infestação pelo inseto-praga, ao longo do armazenamento, interfere no comportamento mecânico dos grãos de feijão, resultando em menores resistências do produto à aplicação de forças;

- o aumento da temperatura de embebição promove o acréscimo da elasticidade do tegumento dos grãos de feijão, proporcionando maior força para sua ruptura;

- com o aumento do tempo de cocção, ocorre a diminuição da resistência à compressão e da força máxima de punção dos grãos de feijão;

- os insetos deterioram os grãos de feijão, refletindo em menores forças máximas de punção;

- o modelo sigmoidal, descrito por meio da série de Taylor, representa adequadamente a resistência dos grãos de feijão à compressão na posição natural de repouso, para os diversos teores de água analisados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-GHANNAM, N.; MCKENNA, B. The application of Peleg's equation to model water absorption during the soaking of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of Food Engineering**. v.32, p.391-401. 1997.

AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, v.3, n.3, p.349-353, 1999.

AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; VILARINHO, M.C.; FRANÇA, A.S. Dinâmica da contração volumétrica do fruto de café durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.Especial, n.8, p.29-35, 2004.

AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C.; ANDRADE, E.T. Análise da variação das propriedades físicas e contração volumétrica dos grãos de milho (*Pennisetum glaucum*) durante o processo de dessecamento. **Revista Brasileira de Armazenamento**. Viçosa, v.25, n.1, p.15-21, 2000.

AGRIFANUAL 2003 - Anuário da agricultura brasileira. São Paulo: Comércio & Consultoria, 2003. 544 p.

ASAE. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, 2003.

AJIBOLA, O.O.; AVIARA N.A.; AJETUMOBI, O.E. Sorption equilibrium and thermodynamic properties of cowpea (*Vigna unguiculata*). **Journal of Food Engineering**, v.58, p.317-324. 2003.

AKINCI I.; OZDEMIR, F.; TOPUZ, A.; KABAS, O.; CANAKCI, M. Some physical and nutritional properties of Juniperus drupacea fruits. **Journal of Food Engineering**, London, v.65, p.325-331, 2004.

AKPINAR, E.K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. **Journal of Food Engineering**, v.59, p.99-104, 2003.

- AMIN, M.N.; OSSAIN, M.A.; ROY, K.C. Effects of moisture content on some physical properties of lentil seeds. **Journal of Food Engineering**, London, v.65, p.83-87, 2004.
- ANDERSON, K.; SCHURLE, B.; REED, C.; PEDERSEN, J. An economic analysis of producers decisions regarding insect control in stored grain. **North Central Journal of Agricultural Economics**, Urbana, v.12, p.23-29, 1990.
- ANDRADE, E.T.; CORRÊA, P.C.; MARTINS, J.H.; ALVARENGA, E.M. Avaliação de dano mecânico em sementes de feijão por meio de condutividade elétrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.1, p.54-60. Campina Grande, 1999.
- ANTUNES, P.L.; SGARBIERI, V.C. Influence of food time and conditions of storage on technological and nutritional properties of dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) variety Rosinha G2. **Journal of Food Science**, v.44, p.1703-1706, 1979.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - AOAC. **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. 14.ed. Arlington: 1984. 1141p.
- AVIARA, N.A.; AJIBOLA, O.O. Thermodynamics of moisture sorption in melon seed and cassava. **Journal of Food Engineering**, v.55, n.2, p.107-113. 2002.
- AYDIN, C. Physical properties of almond nut and kernel. **Journal of Food Engineering**, London, v.60, p.315-320, 2003.
- AYRANCI, E.; DUMAN, O. Moisture sorption isotherms of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and its protein isolate at 10, 20 and 30°C. **Journal of Food Engineering**, v.70, p.83-91, 2005.
- AZZOUZ, S.; GUIZANI, A.; JOMAA, W.; BELGHITH, A. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. **Journal of Food Engineering**, v.55, p.323-330, 2002.
- BABALIS, S.J.; BELESSIOTIS, V.G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**. v.65, p.449-458, 2004.
- BALA, B.K.; WOODS, J.L. Simulation of deep bed malt drying. **Journal Agricultural Engineering Research**, New York, v.30, n.3, p.235-244, 1984.
- BALASUBRAMANIAN, D. Physical Properties of Raw Cashew Nut. **Journal Agricultural Engineering Research**, v.78, n.3, p.291-297, 2001.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G.V.; VEJA-MERCADO, H. Deshidratación de alimentos. Ed. ACRIBIA S.A. 2000, 297p.
- BARGALE-PRAVEEN, C.; IRUDAYARAJ, J.; MARQUIST, B. Studies on rheological behaviour of canola and wheat. **Journal Agricultural of Engineering Research**, n.61, p.267-274, 1995.
- BART-PLANGE, A.; BARYEH, E.A. The physical properties of Category B cocoa beans. **Journal of Food Engineering**, London, v.60, p.219-227, 2003.

- BARYEH, E. A.; MANGOPE, B.K. Some physical properties of QP-38 variety pigeon pea. **Journal of Food Engineering**, London, v.51, p.39-46, 2002.
- BARYEH, E.A. Physical properties of bambara groundnuts. **Journal of Food Engineering**, London, v.47, p.321-326, 2001.
- BARYEH, E.A. Physical properties of millet. **Journal of Food Engineering**, London, v.51, p.39-46, 2002.
- BASUNIA, M.A., ABE, T. Moisture desorption isotherms of medium-grain rough rice. **Journal of Stored Products Research**, v.37, p. 205-219, 2001.
- BATISTA, C.S.; COUTO, S.M.; CECON, P.R.; PEIXOTO, A.B. Efeito da temperatura do ar de secagem, do teor de umidade e do estágio de maturação no módulo de deformidade de frutos de café (*Coffea arabica* L.). **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, Especial café, n.6, p.42-53, 2003.
- BAYRAM, M.; ONER, M.D.; EREN, S. Effect of cooking time and temperature on the dimensions and crease of the wheat kernel during bulgur production. **Journal of Food Engineering**. v.64, p.43-51. 2004a.
- BAYRAM, M.; ONER, M.D.; KAYA, A. Influence of soaking on the dimensions and colour of soybean for bulgur production. **Journal of Food Engineering**. v.61, p.331-339. 2004b.
- BELLO, M.; TOLABA, M.P.; SUAREZ, C. Factors affecting water uptake of rice grain during soaking. **Food Science Technology**, v. 37, p.811-816, 2004.
- BERBERT, P.A.; QUEIROZ, D.M.; SILVA, J.S.; PINHEIRO FILHO, J.B. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.60, n.3, p.167-173, 1995.
- BHATTACHARYA, S. Kinetics of hydration of raw and roasted corn semolina. **Journal of Food Engineering**, v.25, p.21-30, 1995.
- BILBAO-SÁINZ, C.; ANDRÉS, A.; FITO, P. Hydration kinetics of dried apple as affected by drying conditions. **Journal of Food Engineering**, v.68, p.369-376, 2005.
- BRACKMANN, A.; NEUWALD, D.A.; RIBEIRO, N.D.; MEDEIROS, E.A.A. Condição de armazenamento de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) do grupo carioca "FT Bonito". **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.27, n.1, p.16-20. Viçosa, 2002.
- BRAGANTINI, C. Produção de sementes. In: ARAÚJO, R.S.; AGUSTIN RAVA, C.; STONE, L.F. ZIMMERMANN, M.J.O. **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: Potafos, 1996. Sc. 4, p.639-667.
- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 1992. 365p.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.

- BRÓVIA I PIJUAN, M.N.; BROD, F.P.R.; PARK, K.J. Estudio de secado de champiñón en conserva (*Agaricus bisporus*) utilizando un secador vertical. **Alimentaria: revista de tecnología e higiene de los alimentos**. v.286, p.119-122, 1997.
- BURR, K.H.; KON, S.; MORRIS, H.J. Cooking rates of dry beans as influenced by moisture content, temperature and time of storage. **Food Technology**, Chicago, v.22, p.336-338, 1968.
- CARMO, J.E.F.; LIMA, A.G.B. Drying of lentils including shrinkage: a numerical simulation. **In: Proceeding of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)**. São Paulo. Brazil, 2004. v.A, p.510-517.
- CHANDRASEKAR, S.V.; VISWANATHAN, R. Physical and thermal properties of coffee. **Journal Agricultural Engineering Research**, v.73, p.227-234, 1999.
- CHEN, C. A rapid method to determine the sorption isotherms of peanuts. **Journal Agricultural Engineering Research**, New York, v.75, p.401-408, 2000a.
- CHEN, C. Factors which effects equilibrium relative humidity of agricultural products. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.43, n.3, p.673-683, 2000b.
- CHEN, C.; MOREY, R.V. Comparison of four EMC/ERII equations. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.32, n.3, p.983-990, 1989.
- CHIARADIA, A.C.N. **Determinação da estrutura de pigmentos de feijão e estudo da sua ação na qualidade protéica**. Viçosa, 1997. 107p. (Tese de Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- CHIARADIA, A.C.N.; GOMES, J.C. **Feijão: química, nutrição e tecnologia**. Viçosa: Fundação Arthur Bernardes. 1997. 180p.
- CHRIST, D. **Curvas de equilíbrio higroscópico e de secagem da canola (*Brassica napus* L. var. oleifera) e efeito da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem sobre a qualidade das sementes**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1996. 50p. Dissertação de Mestrado.
- CHRISTENSEN, C.M.; KAUFMANN, H.H. Microflora. In: CHRISTENSEN, C.M. **Storage of cereal grain and their products**. St. Paul: American Association of Cereal Chemists, 1974. p.158-192.
- COELHO, C.M.M. **Caracterização genética de dois acessos de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) com ênfase na qualidade pós-colheita**. Piracicaba, 1998. 105p. (Tese de Mestrado em Ciências).
- CONAB - www.conab.gov.br, jan/2005.
- CORDEIRO, I.C. **Influência do teor de água na colheita e da temperatura do ar de secagem na qualidade do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Viçosa, 2001.100p. (Tese de Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

- CORRÊA, P.C.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; QUEIROZ, D.M.; SAMPAIO, C.P.; CARDOSO, J.B. Variação das dimensões características e da forma dos frutos de café durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.3, p.466-470, 2002.
- CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; RESENDE, O.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; GONELI, A.L. Mathematical modelling for representation of coffee berry volumetric shrinkage. **In: Proceeding of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)**. São Paulo. Brazil, 2004a. v.A, p.742-747.
- CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; RESENDE, O.; HENRIQUES, D.R.; SOUZA, M.A. Análise da porosidade, massa específica aparente e real do trigo durante o processo de secagem. **In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33, 2004**, São Pedro, SP. **Anais...** São Pedro: SBEA, 2004b. CD Rom.
- COUTO, S.A.; BATISTA, C.S.; PEIXOTO, A.B.; DEVILLA, I.A. Comportamento mecânico de frutos de café: módulo de deformidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.6, n.2, 2002, p.285-294.
- CRUZ, G.A.D.R. **Avaliação da qualidade e digestibilidade em vivo da proteína de cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Viçosa, 2000. 68p. (Tese de Mestrado em Bioquímica Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- CRUZ, G.A.D.R. **Efeito do armazenamento sobre a digestibilidade e qualidade protéica de cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Viçosa, 2003. 95p. (Tese de Doutorado em Bioquímica Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- CRUZ, G.A.D.R.; OLIVEIRA, M.G.A.; PIRES, C.V.; GOMES, M.R.A.; COSTA, N.M.B.; BRUMANO, M.H.N.; MOREIRA, M.A. Protein quality and in vivo digestibility of different varieties of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Brazilian Journal of Food Technology**. v.6, n.2, 2003, p.157-162.
- CRUZ, G.A.D.R.; OLIVEIRA, M.G.A.; PIRES, C.V.; PILON, A.M.; CRUZ, R.S.; BRUMANO, M.H.N.; MOREIRA, M.A. Avaliação da digestibilidade protéica, inibidor de protease e fibras alimentares de cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Brazilian Journal of Food Technology**. v.7, n.2, 2004, p.103-109.
- DEL VALLE, J.M.; COTTRELL, T.J.; JACKMAN, R.L.; STANLEY, D.W. Hard-to-cook defect in black beans: the contribution of proteins to salt soaking effects. **Food Research International**, n.25, p.429-436, 1992.
- DOYMAZ, I. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. **Journal of Food Engineering**, v.61, p.359-364, 2004.
- DOYMAZ, I. Drying behaviour of green beans. **Journal of Food Engineering**, v.69, p.161-165, 2005a.
- DOYMAZ, I. Drying characteristics and kinetics of okra. **Journal of Food Engineering**, v.69, p.275-279, 2005b.
- DOYMAZ, I.; PALA, M. The thin-layer drying characteristics of corn. **Journal of Food Engineering**, v.60, p.125-130, 2003.

EMBRAPA - www.cnpaf.embrapa.br, jan/2005.

ENGELS, C.; HENDRICKX, M.; DE SAMBLANX, S.; DE GRYZE, I.; TOBBACK, P. Modeling water diffusion during long-grain rice soaking. **Journal of Food Engineering**, v.5, p.55-73, 1986.

EPAMIG - <http://revista.fapemig.br/1/pesquisa/>, fev/2005.

ERTEKIN, C.; YALDIZ, O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. **Journal of Food Engineering**, v.63, p.349-359, 2004.

FAO -

<http://faostat.fao.org/faostat/servlet/XteServlet?Areas=%3E862&Items=176&Elements=51&Years=2004&Format=Table&Xaxis=Years&Yaxis=Countries&Aggregate=&Calculate=&Domain=SUA&ItemTypes=Production.Crops.Primary&language=EN>, nov/2005.

FAN, J.; SIEBENMORGEN, T.J.; MARKS, B.P. Effects of variety and harvest moisture content on equilibrium moisture contents of rice. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.16, n.3, p.245-251, 2000.

FARONI, L.R.A.; SILVA, J.F.; SILVA, F.A.P. Pragas e métodos de controle. In: SILVA, J.S. (Ed.). **Pré-processamento de produtos agrícolas**. Juiz de Fora: Instituto Maria, 1995. p.363-392.

FERNANDES, G.M.B.; SOUZA FILHO, B.F. **Armazenamento de sementes de feijão na pequena propriedade**. Rio de Janeiro: PESAGRO, 2001. 5 p.

FERREIRA, C.D.; PENA, R.S. Comportamento higroscópico da farinha de pupunha (*Bactris gasipaes*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.23, n.2, p.251-255, 2003.

FORTES M.; OKOS, M.R.; Drying theories. In: **Advances in Drying**. MUJUMDAR, A.S. New York: Hemisphere Publishing, v.1, 1980a.

FORTES, M.; OKOS, M.R. Changes physical properties of corn during drying. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v.23, n.4, p.1004-1008, 1980b.

GEANKOPLIS, C.J. Drying of process materials. In: **Transport processes and unit operations**. Boston: Allyn and Bacon, ed 2, 1983.

GUEVARA, L.L.V. **Avaliação sensorial e inativação de lipoxigenase em feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) armazenados em condições ambientais**. 1990. 132 p. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

GUPTA, R. K.; DAS, S. K. Fracture resistance of sunflower seed and kernel to compressive loading. **Journal of Food Engineering**. v.46, 2000, p.1-8.

GUSTAFSON, R.J.; HALL, G.E. Density and porosity changes of shelled corn during drying. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.15, n.1, p.523-525, 1972.

HALL, C.W. Drying and storage of agricultural crops. Westport: AVI, 1980. 381p.

- HENRY, Z. A.; SU, B.; ZHANG, H. Resistance of soya beans to compression. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v. 76, p.175-181, 2000a.
- HENRY, Z.A.; ZHANG, H.; ONKS, D. Generalized model of resistance to strain of cellular material. American Society of Agricultural Engineers, Paper N° 96-6023, St. Joseph, MI, USA. p.1-26, 1996.
- HENRY, Z. A.; ZHANG, H.; SU, B.; ONKS, D. O. Elastic properties of the tobacco leaf. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v.76, p.101-110, 2000b.
- HINCKS, M.J.; STANLEY, D.W. Lignification: evidence for a role in hard-to-cook beans. **Journal of Food Biochemistry**, v.11, n.1, p.41-58. 1987.
- HSU, H.W.; VAVAK, D.L.; SATTERLEE, L.D.; MILLER, G.A. A multienzyme technique for estimating protein digestibility. **Journal of Food Science**, N. La Salle St., v.42, p.1269-1273, 1977.
- HUGHES, J. S. Potential contribution of dry bean dietary fiber to health. **Food Technology**, v. 45, n.9, p.122-126, 1991.
- IADEROZA, M.; SALES, A.N.; BALDINI, V.L.S.; SARTORI, M.L.; FERREIRA, V.L.P. Atividade de polifenoloxidase e alterações da cor e dos teores de taninos condensados em novas cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) durante o armazenamento. Coletânea do Instituto de Tecnologia de Alimentos, Campinas, n.19, p.154-164, 1989.
- IBARRA-PÉREZ, F.J.; CASTILHO ROSALES, A.; CUELLAR EVENOR, I. Treshing effect on cooking time in commercial beans cultivars from the semiarid highlands of Mexico. **Bean Improvement Cooperative**, Cali, v.39, p.264-265, Feb. 1996.
- IGLESIAS, H.; CHIRIFE, J. Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material. **Journal of Food Technology**, Oxford, v.11, p.109-116, 1976.
- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A., 1992. 380p.
- JAYAS, D.S.; MAZZA, G. Comparacion of five, three-parameters equations for description of adsorption data of oats. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.36, n.1, p.119-124, 1993.
- JAYENDRA KUMAR, A.; SINGH, R.R.B.; PATIL, G.R.; PATEL, A.A. Effect of temperature on moisture desorption isotherms of *kheer*. **Food Science and Technology**, v.38, p.303-310, 2005.
- KALEEMULLAH, S.; GUNASEKAR, J.J. Moisture-dependent physical properties of arecanut kernels. **Biosystems Engineering**, London, v.82, n.3, p.331-338, 2002.
- KAYACIER, A.; SINGH, R.K. Application of effective diffusivity approach for the moisture content prediction of tortilla chips during baking. **Swiss Society of Food Science and Technology**, v.37, p.275-281, 2004.
- KAYMAK-ERTEKIN, F. Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers. **Journal of Food Science**. v.67, n.1, p.168-175, 2002.

- KHRAISHEH, M.A.M.; MCMINN, W.A.M.; MAGEE, T.R.A. Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. **Food Research International**, v.34. p.497-503, 2004.
- KITIC, D.; VIOLLAZ, P.E. Comparison of drying kinetic of soybean in thin layer and fluidized beds. **Journal of Food Technology**, v.19, p.399-408, 1984.
- KROKIDA, M.K.; MAROULIS, Z.B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. **Drying Technology**, New York, v.15, n.10, p.2441-2458, 1997.
- LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J.T. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). **Journal of Food Engineering**, London, n.61, p.173-179, 2004.
- LANG, W.; SOKHANSANJ, S. Bulk volume shrinkage during drying of wheat and canola. **Journal of Food Process Engineering**, Trumbull, v.16, n.4, p.305-314, 1993.
- LANG, W.; SOKHANSANJ, S.; ROHANI, S. Dynamic shrinkage and variable parameters in Bakker-Arkema's mathematical simulation of wheat and canola drying. **Drying Technology**, New York, v.12, n.7, p.1687-1708, 1994.
- LEWICKI, P. P. Some remarks on rehydration of dried foods. **Journal of Food Engineering**, v.36, n.1, p.81-87, 1998.
- LEWIS, M.J. **Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesados**. Zaragoza: Editorial Acribia S.A., 1993. 494p.
- LI, Y.; ZHANG, Q.; PURI, V. M.; MAMBECK, H. B. Physical properties effect on stress-strain behavior of wheat en masse-Part I. Load response dependence on initial bulk density in moisture content. **Transactions of the ASAE**. v.32, n.1, p.194-202, 1989.
- LIU, M.; HAGHIGHI, K.; STROSHINE, R.L.; TING, E.C. Mechanical properties of soybean cotyledon and failure strength of soybean kernel. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. v.33, 1990, p.559-565.
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, London, v.29. p.75-97, 1996.
- MAYOR, L.; SERENO, A.M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, London, v.61, p.373-386, 2004.
- MCMINN, W.A.M.; MAGEE, T.R.A. Physical characteristics of dehydrated potatoes – part I. **Journal of Food Engineering**, London, v.33, n.1-2, p.37-48, 1997.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**. p.513-518, 2005.
- MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.

- MOLINA, M.R.; LA FUENTE, G.; BRESSANI, R. Interrelationships between storage, soaking time, nutritive value and other characteristics of the black bean (*Phaseolus vulgaris*). **Journal of Food Science**, v.40, p.587-591, 1975.
- MULET, A.; GARCIA-REVERTER, J.; SANJUÁN, R.; BON, J. Sorption isosteric heat determination by thermal analysis and sorption isotherms. **Journal of Food Science**, v.64, n.1, p.64-68, 1999.
- MULET, A.; GARCIA-PASCUAL, P.; SANJUÁN, N.; GARCÍA-REVERTER, J. Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (*Morchella esculenta*). **Journal of Food Engineering**, London, v.53, p.75-81, 2002.
- NAVARRETE, D.A.; BRESSANI, R. Protein digestibility and protein quality of common beans (*Phaseolus vulgaris*) fed alone and with maize, in adult humans using a short-term nitrogen balance assay. **Am. J. Clin. Nutr.**, v.34, p. 1893-1898, 1981.
- NIELSEN, S. S. Digestibility of legume proteins. **Food Technology**, v.45, n.6, p.112-114, 1991.
- OLIVEIRA, J.R.; CAVALCANTI MATA, M.E.R.; DUARTE, M.E.M. Isotermas de dessecção de grãos de feijão macassar verde (*Vigna unguiculata* (L.) Walpers), variedade sempre-verde. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.6, n.1, p.61-70, 2004.
- OLIVEROS-TASCON, C.E.; MONTOYA-RESTREPO, E.C.; AYALA, A.A. Efecto de la broca Del café em la firmeza Del grano em los estados de cereja, pergamino húmedo y pergamino seco. **Cenicafe**, v.53, p.25-33, 2002.
- OSBORN, T.C. Genetic control of bean seed protein. **CRC Crit. Rev. Plant Sci.**, v.7, p.93-116, 1988.
- OZARSLAN, C. Physical Properties of Cotton Seed. **Biosystems Engineering**, v.83, n.2, p.169-174, 2002.
- OZDEMIR, M.; DEVRES, Y.O. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. **Journal of Food Engineering**, v.42, p.225-233, 1999.
- PAKSOY, M.; AYDIN, C. Some physical properties of edible squash (*Cucurbita pepo* L.) seeds. **Journal of Food Engineering**, London, v.65, p.225-231, 2004.
- PAN, Z.; TANGRATANAVALEE, W. Characteristics of soybeans as affected by soaking conditions. **Food Science Technology**, v.36, p.143-151, 2003.
- PARK, K.J.; BROD, F.P.R.; SILVA, J.E.A.R. Estudo comparativo de secagem de cebolinha (*Allium sp.* Cv. Galega) utilizando secadores vertical e horizontal. **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.16, n.2, p.143-145, 1996.
- PELEG, M. An empirical model for the description of moisture sorption curves. **Journal of Food Science**, v.52, p.1216-1219, 1988.

PETERSON, J.M.; PERDOMO, J.A.; BURRIS, J.S. Influence of kernel position, mechanical damage and controlled deterioration estimates on hybrid maize seed quality. **Seed Science and Technology**. v.23, 1995, p.647-657.

PIRES, C.V. **Caracterização bromatológica e digestibilidade *in vitro* de proteínas de cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Viçosa, 2002. 84p. (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

PIRES, C.V. Otimização de técnicas de determinação da digestibilidade *in vitro* para a substituição da digestibilidade *in vivo* no cálculo do escore químico corrigido pela digestibilidade protéica - PDCAAS. **Viçosa, 2005. 70p. (Tese de Doutorado em Bioquímica Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.**

PRADO, M.E.T.; ALONSO, L.F.T.; PARK, K.J. Shrinkage of dates (*Phoenix Dacyilyfera* L.) during drying. **Drying Technology**, New York, v.18, n.1 e 2, p.295-310, 2000.

PRUSSIA, S. E.; CAMPBELL, D. T. Apparent modulus elasticity of maturing pecans. **Transactions of the ASAE**. v.28, n.4, p.1290-1296, 1985.

RAHMAN, S. **Food properties handbook**. Boca Ratón, Florida, CRC Press LLC, 1995. 500p.

RAMESH, M.N. Moisture transfer properties of cooked rice during drying. **Journal of Food Science**, N. La Salle St., v.36, p.245-255, 2003.

RAMOS, A.M.; PEREIRA, J.A.M.; QUEIROZ, D.M. Equações de secagem de trigo em camada fina e determinação dos coeficientes de difusão líquida. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.18-19, n.1-2, p.43-47, 1993/1994.

RAMOS, I.N.; BRANDÃO, T.R.S.; SILVA, C.L.M. Integrated approach on solar drying, pilot convective drying and microstructural changes. **Journal of Food Engineering**, London, v.67, p.195-203, 2005.

RAMOS, I.N.; SILVA, C.L.M.; SERENO A.M.; AGUILERA, J.M. Quantification of microstructural changes during first stage air drying of grape tissue. **Journal of Food Engineering**, London, v.62, p.159-164, 2004.

RAMOS JÚNIOR, E.U.; LEMOS, L.B.; SILVA, T.R.B. Características tecnológicas de cultivares de feijão antes e após o armazenamento. **Revista Brasileira de Armazenamento**. Viçosa, v.30, n.1, p.97-103, 2005.

RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, London, v.23, n.1, p.91-105, 1994.

RESENDE, O.; BOREM, F.M.; GRIS, C.F.; PEREIRA, R.G.F.A. Avaliação da qualidade tecnológica de grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) armazenados na presença de equipamento redutor de inóculo. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.29, n.2, p.143-151. Viçosa, 2004.

RESIO, A.N.C.; AGUERRE, R.J.; SUAREZ, C. Analysis of simultaneous water absorption and water-starch reaction during soaking of amaranth grain. **Journal of Food Engineering**, v.68, p.265-270, 2005.

- RESIO, A.N.C.; AGUERRE, R.J.; SUAREZ, C. Study of some factors affecting water absorption by amaranth grain during soaking. **Journal of Food Engineering**, v.60, p.391-396, 2003.
- RIBEIRO, D.M.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; RODRIGUES, D.H. Propriedades mecânicas dos grãos de soja em função do teor de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34, 2005, Canoas, RS. **Anais...** Canoas: SBEA, 2005. 1CD Rom.
- RIBEIRO, D.M.; CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; GUIMARÃES, F.F.; COSTA, D.R. Forma, tamanho e contração volumétrica do trigo durante o processo de secagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33, 2004, São Pedro, SP. **Anais...** São Pedro: SBEA, 2004. 1CD Rom.
- RIOS, A.O.; ABREU, C.M.P.; CORRÊA, A.D. Efeito da estocagem e das condições de colheita sobre algumas propriedades físicas, químicas e nutricionais de três cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas. v.23, p.39-45. 2003.
- RUFFATO, S.; CORRÊA, P.C.; MARTINS, J.H.; MANTOVANI, B.H.M.; SILVA, J.N. Influência do processo de secagem sobre a massa específica aparente, massa específica unitária e porosidade de milho-pipoca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.1, p.45-48, 1999.
- SACILIK, K.; OZTURK, R.; KESKIN, R. Some physical properties of hemp seed. **Biosystems Engineering**, v.86, n.2, p.191-198, 2003.
- SAHOO, P.K.; SRIVASTAVA, A.P. Physical Properties of Okra Seed. **Biosystems Engineering**, v.84, n.4, p.441-448, 2002.
- SARTORI, M.R. **Technological quality of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) stored under nitrogen**. Manhattan, U.S.A., Department of Grain Science and Industry, Kansas State University 1982. (Ph.D. Dissertation).
- SENADEERA, W.; BHADARI, B.R.; YOUNG, G.; WIJESINGHE, B. Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. **Journal of Food Engineering**, v.58, p.277-283, 2003.
- SGARBIERI, V.C. **Alimentação e nutrição – fator de saúde e desenvolvimento**. Campinas: UNICAMP, 1987. 387p.
- SGARBIERI, V.C. Composition and Nutritive value of beans. **World Revision Nutritional Diety**, v.60, n.1, p.132-198, 1989.
- SHIGA, T.M.; LAJOLO, F.M.; FILISETTI, T.M.C.C. Changes in the cell wall polysaccharides during storage and hardening of beans. **Food Chemistry**, v.84, p.53-64, 2004.
- SILVA, J.S.; QUEIROZ, D.M. Colheita, trilha, secagem e armazenagem. In: VIEIRA, C.; PAULA JÚNIOR, T.J.; BORÉM, A. (Eds.). **Feijão: aspectos gerais e cultura no Estado de Minas Gerais**. Viçosa: UFV, 1998. p.559-585.

SIMAL, S.; MULET, A.; TARRAZOB, J.; ROSSELLÓ, C. Drying models for green peas. **Food Chemistry**, v.55, n.2, p.121-128, 1996.

SOARES, J.B. **Curvas de secagem em camada fina e propriedades físicas de soja (*Glicine Max L.*)**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1986. 91p. Dissertação de Mestrado.

SOKHANSANJ, S.; LANG, W. Prediction of kernel and bulk volume of wheat and canola during adsorption and desorption. **Journal Agricultural Engineering Research**, New York, v.63, n.2, p.129-136, 1996.

SUN, D.W.; WOODS, J.L. Low temperature moisture transfer characteristics of wheat in thin layers. **Transactions of ASAE**. v.37. p.1919-1926, 1994.

TAGAWA, A.; MURATA, S.; HAYASHI, H. Latent heat of vaporization in buckwheat using the data of equilibrium moisture content. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.36, n.1, p.113-118. 1993.

TALHA, A.; PUIGGAL, J.R.; JOMAA, W.; JANNOT, Y. Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana. **Journal of Food Engineering**, v.64, p.103-109, 2004.

TOLABA, M.P.; PELTZER, M.; ENRIQUEZ, N.; POLLIO, M.L. Grain sorption equilibria of quinoa grains. **Journal of Food Engineering**, v.61, p.365-371, 2004.

TOMÉ, P.H.F.; SANTOS, J.P.; CABRAL, L.C.; CHANDRA, P.K.; GONÇALVES, R.A. Uso da atmosfera controlada pelo CO₂ e N₂ na preservação das qualidades tecnológicas do feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) durante o armazenamento. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa. v.25, n.2, p.16-22. 2000.

TOWNER, G.D. The tensile stress generated in clay through drying. **Journal Agricultural Engineering Research**, New York, v.37, n.4, p.279-289, 1987.

TURHAN, M.; SAYAR, S.; GUNASEKARAN, S. Application of Peleg model to study water absorption in chickpea during soaking. **Journal of Food Engineering**, v.53, p.153-159, 2002.

UDAETA, J.E.M.; LAJOLO, F.M. Compostos fenólicos e sua relação com o endurecimento de feijões (*Phaseolus vulgaris L.*) em diferentes condições de armazenamento. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DE ALIMENTOS. 2., 1997. Campinas: FEA/UNICAMP, 1997. 95p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **Handbook of the nutritional contents of foods**. New York: Dover Publications Inc., 1975. 190p.

VERMA, R.C.; PRASAD, S. Kinetics of absorption of water by maize grains. **Journal of Food Engineering**, v.39, 395-400, 1999.

VIEIRA, R.D.; KRZYZANOWSKI, F.C. Teste de condutividade elétrica. In: KRZYZANOWSKI, F.C.; VIEIRA, R.D.; FRANÇA NETO, J.B. (Eds.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina, PR: ABRATES, 1999. Cap. 4, p.1-26.

WANG, N.; BRENNAN, J.G. Moisture sorption isotherm characteristics of potato at four temperatures. **Journal of Food Engineering**, v.14, p.269-287, 1991.

WHITE, G.M.; ROSS, I.J.; PONELEIT, C.G. Stress crack development in popcorn as influenced by drying and rehydration processes. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.25, n.3, p.768-772, 1982.

YALDIZ, O.; ERTEKIN,C.; UZUN, H.I. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. **Energy**, v.26, p.457-465, 2001.

ZHANG, Q.; LI, Y; PURI, V. M.; MANBECK, H. B. Physical properties effect on stress-strain behavior of wheat en masse – Part II. Constitutive elastoplastic parameter dependence on initial bulk density and moisture content. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.32, n.1, p.203-209, 1989.

ZHANG, X.; LIU, X.; GU, D.; ZHOU, W.; WANG, R.; MARINOS-KOURIS, D. Desorption isotherms of some vegetables. **Journal of Science and Food Agriculture**, v.70, p.303-306, 1996.

ZOGZAS, N.P.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. **Drying Technology**, New York, v.12, n.7, p.1653-1666, 1994.

ZOGZAS, N.P.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, New York, v.14, n.10, p.2225-2253, 1996.

APÊNDICES

APÊNDICE A

QUADRO 1A. Resumo da análise de variância para o coeficiente de difusão durante a secagem do feijão nas diversas condições de ar, considerando a contração volumétrica dos grãos

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados médios
Contração (C)	1	$1,5498 \times 10^{-19**}$
Condição de ar (Car)	13	$2,8960 \times 10^{-19**}$
C x Car	13	$1,8935 \times 10^{-21**}$
Resíduo	28	$3,0878 \times 10^{-22}$
Total	55	
CV (%) = 3,03		

**Significativo a 1% pelo teste F.

QUADRO 2A. Resumo da análise de variância para o coeficiente de difusão durante a embebição do feijão nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C, considerando a expansão volumétrica dos grãos

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados médios
Expansão (E)	1	$1,4177 \times 10^{-18**}$
Temperatura (T)	3	$1,8193 \times 10^{-19**}$
E x T	3	$1,5640 \times 10^{-20 \text{ ns}}$
Resíduo	16	$6,1482 \times 10^{-21}$
Total	23	
CV (%) = 7,06		

^{ns} não significativo.

**Significativo a 1% pelo teste F.

QUADRO 3A. Resumo da análise de variância do grau de infestação (GI), teor de água (U) e porosidade intergranular (Pr) dos grãos de feijão, com e sem a infestação de insetos, ao longo das épocas de armazenamento (0, 28, 56, 84 e 112 dias)

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados médios		
		GI	U	Pr
Infestação (I)	1	4060,0333*	26,3765**	114,2701**
Resíduo a	2	64,6333	0,0287	0,8991
Época (E)	4	2319,0000**	6,0325**	118,4424**
E x I	4	2307,3666**	16,3697**	25,2206**
Resíduo b	18	48,1889	0,1606	1,3182
Total	29			
CV _{parcela} (%) = 67,94				
CV _{sub parcela} (%) = 58,66				

*Significativo a 5% pelo teste F.

**Significativo a 1% pelo teste F.

QUADRO 4A. Resumo da análise de variância da massa específica aparente (ρ_{ap}), diferença total de cor (ΔE) e do cromatismo referente a cor (Cr) dos grãos de feijão, com e sem a infestação de insetos, ao longo das épocas de armazenamento (0, 28, 56, 84 e 112 dias)

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados médios		
		ρ_{ap}	ΔE	Cr
Infestação (I)	1	11641,9120**	2,2249 ^{ns}	4,6807**
Resíduo a	2	0,1281	0,1499	0,0412
Época (E)	4	6881,2235**	6,6356**	5,9443**
E x I	4	7041,3744**	0,4326**	4,8052**
Resíduo b	18	25,9198	0,0913	0,4222
Total	29			
CV _{parcela} (%) = 0,04				
CV _{sub parcela} (%) = 0,60				

^{ns} não significativo.

**Significativo a 1% pelo teste F.

QUADRO 5A. Resumo da análise de variância das coordenadas “L”, “a” e “b” referentes a cor dos grãos de feijão, com e sem a infestação de insetos, ao longo das épocas de armazenamento (0, 28, 56, 84 e 112 dias)

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados médios		
		L	a	b
Infestação (I)	1	0,6395 ^{ns}	5,3933 ^{**}	0,000013 ^{ns}
Resíduo a	2	0,0557	0,0163	0,0534
Época (E)	4	2,7794 ^{**}	6,9148 ^{**}	0,9526 ^{**}
E x I	4	1,2106 ^{**}	5,1474 ^{**}	0,1166 ^{ns}
Resíduo b	18	0,2297	0,3360	0,1401
Total	29			
CV _{parcela} (%) = 1,04				
CV _{sub parcela} (%) = 2,11				

^{ns} não significativo.

^{**}Significativo a 1% pelo teste F.

QUADRO 6A. Resumo da análise de variância do tempo de cocção (Tc), condutividade elétrica (CE), teor de proteínas (Tp) e digestibilidade das proteínas (Dg) dos grãos de feijão, com e sem a infestação de insetos, ao longo das épocas de armazenamento (0, 28, 56, 84 e 112 dias)

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados médios			
		Tc	CE	Tp	Dg
Infestação (I)	1	128,7955 [*]	10747,3184 ^{**}	6,6270 ^{ns}	26,9043 ^{ns}
Resíduo a	2	6,0524	37,3056	0,6377	1,7028
Época (E)	4	431,9059 ^{**}	13491,6619 ^{**}	5,5005 ^{**}	6,3049 ^{ns}
E x I	4	72,5851 [*]	8310,6808 ^{**}	4,9645 ^{**}	10,4956 ^{ns}
Resíduo b	18	19,3011	240,0155	0,3267	11,1955
Total	29				
CV _{parcela} (%) = 6,56					
CV _{sub parcela} (%) = 11,72					

^{ns} não significativo.

^{*}Significativo a 5% pelo teste F.

^{**}Significativo a 1% pelo teste F.

QUADRO 7A. Resumo da análise de variância da absorção de água dos grãos de feijão submetidos a diferentes temperaturas de embebição (20, 30, 40 e 50 °C), com e sem a infestação de insetos, ao longo do período de armazenamento

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados médios
Infestação (I)	1	0,02077**
Temperatura (T)	3	0,05372**
I x T	3	0,00531**
Resíduo - a	14	0,00063
Época (E)	4	0,02027**
E x I	4	0,01459**
E x T	12	0,00323**
E x T x I	12	0,00417**
Resíduo - b	66	0,00074
Total	119	
CV _{parcela} (%) = 1,75		
CV _{sub parcela} (%) = 1,88		

**Significativo a 1% pelo teste F.

QUADRO 8A. Resumo da análise de variância do módulo proporcional de deformidade do feijão obtido para diversos teores de água (0,423; 0,370; 0,311; 0,258; 0,208; 0,166; 0,136 decimal b.s.), deformações (0,0004; 0,0008; 0,0012; 0,0016 e 0,002 m) e posições de compressão (P₁, P₂ e P₃)

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados médios
Teor de água (U)	6	12983,9143**
Deformação (D)	4	7638,7886**
Posição (P)	2	5763,1271**
U x D	24	1288,2175**
U x P	12	519,4171**
D x P	8	13,5819*
U x D x P	48	31,5196**
Resíduo	945	
Total	1049	
CV (%) = 21,59		

*Significativo a 5% pelo teste F.

**Significativo a 1% pelo teste F.

QUADRO 9A. Resumo da análise de variância para a força de compressão aplicada na posição natural de repouso (P₁), sobre o hilo (P₂) e com o hilo na posição vertical (P₃), obtidas para diversas deformações (0,0004; 0,0008; 0,0012; 0,0016 e 0,002 m) ao longo das épocas de armazenamento (0, 28, 56, 84 e 112 dias)

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados médios		
		P ₁	P ₂	P ₃
Infestação (I)	1	540098,5874**	70255,7433**	47185,2887**
Deformação (D)	3	1354343,7161**	201939,2254**	44222,8007**
I x D	3	23200,4920**	3442,8013**	728,0348 ^{ns}
Resíduo a	63	2146,7242	698,802849	291,7707
Época (E)	4	76481,5415**	14079,1327**	8301,0044**
E x I	4	272442,8594**	36936,4489**	5681,4288**
E x D	12	9043,9980**	2373,4725**	1367,8582**
E x D x I	12	18239,7022**	2013,4722**	774,5220**
Resíduo b	297	2749,3315	777,3468	192,8984
Total	399			
CV _{parcela} (%) = 20,22				
CV _{sub parcela} (%) = 22,88				

^{ns} não significativo.

**Significativo a 1% pelo teste F.

QUADRO 10A. Resumo da análise de variância da força para rompimento do tegumento do feijão, obtida para as temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C ao longo das épocas de armazenamento (0, 28, 56, 84 e 112 dias)

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados médios
Infestação (I)	1	2562,6375**
Temperatura (T)	3	7123,9377**
I x T	3	161,5841 ^{ns}
Resíduo a	63	139,9681
Época (E)	4	1284,9138**
E x I	4	2338,0239**
E x T	12	251,8174*
E x T x I	12	183,6102 ^{ns}
Resíduo b	297	126,9653
Total	399	
CV _{parcela} (%) = 18,70		
CV _{sub parcela} (%) = 17,81		

^{ns} não significativo.

*Significativo a 5% pelo teste F.

**Significativo a 1% pelo teste F.

QUADRO 11A. Resumo da análise de variância da força de compressão do feijão, obtida para os tempos de cocção de 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 min ao longo das épocas de armazenamento (0, 28, 56, 84 e 112 dias)

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados médios
Infestação (I)	1	1848,1678 ^{ns}
Tempo de cocção (Tc)	6	147676,1980 ^{**}
I x Tc	6	1337,5898 ^{ns}
Resíduo a	117	666,2739
Época (E)	4	6746,7461 ^{**}
E x I	4	860,7745 ^{ns}
E x Tc	24	1490,0513 ^{**}
E x Tc x I	24	915,1053 [*]
Resíduo b	513	601,1203
Total	699	
CV _{parcela} (%) = 33,44		
CV _{sub parcela} (%) = 31,76		

^{ns} não significativo.

*Significativo a 5% pelo teste F.

**Significativo a 1% pelo teste F.

QUADRO 12A. Resumo da análise de variância da força máxima de punção do feijão, para as temperaturas de embebição de 20, 30, 40 e 50 °C, ao longo das épocas de armazenamento (0, 28, 56, 84 e 112 dias)

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados médios
Infestação (I)	1	24372,6607 ^{**}
Temperatura (T)	3	2600,9072 ^{**}
I x T	3	57,4881 ^{ns}
Resíduo a	21	125,4579
Época (E)	4	15166,3839 ^{**}
E x I	4	10743,7807 ^{**}
E x T	12	365,4260 [*]
E x T x I	12	271,3342 [*]
Resíduo b	99	127,0644
Total	159	
CV _{parcela} (%) = 5,03		
CV _{sub parcela} (%) = 5,06		

^{ns} não significativo.

*Significativo a 5% pelo teste F.

**Significativo a 1% pelo teste F.

QUADRO 13A. Resumo da análise de variância da força máxima de punção do feijão, para os tempos de cocção de 0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 min, ao longo das épocas de armazenamento (0, 28, 56, 84 e 112 dias)

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados médios
Infestação (I)	1	10882,1951**
Tempo cocção (Tc)	6	163290,1782**
I x T	6	813,7001**
Resíduo a	39	33,7281
Época (E)	4	916,1311**
E x I	4	4448,1569**
E x Tc	24	958,7943**
E x Tc x I	24	501,8681**
Resíduo b	171	43,9391
Total	279	
CV _{parcela} (%) = 6,35		
CV _{sub parcela} (%) = 7,25		

**Significativo a 1% pelo teste F.

APÊNDICE B

QUADRO 1B. Valores médios do teor de água (U*, decimal b.s.) obtidos durante a secagem dos grãos de feijão, para diferentes valores de umidade relativa e temperatura do ar de secagem de 35 °C

Umidade relativa do ar de secagem (%)					
30±1%		40±1%		60±1%	
Tempo (h)	U* (decimal b.s.)	Tempo (h)	U* (decimal b.s.)	Tempo (h)	U* (decimal b.s.)
0,00	0,915	0,00	0,946	0,00	0,941
0,50	0,689	0,50	0,705	0,50	0,753
1,50	0,528	1,50	0,516	1,50	0,572
2,50	0,429	2,50	0,398	3,00	0,429
3,50	0,364	3,50	0,316	4,00	0,370
5,50	0,285	4,50	0,269	6,00	0,287
19,83	0,131	6,00	0,214	8,00	0,239
-	-	20,00	0,113	22,16	0,151
-	-	-	-	25,16	0,149

QUADRO 2B. Valores médios do teor de água (U, %b.s.) obtidos durante a secagem dos grãos de feijão, para diferentes valores de umidade relativa e temperatura do ar de secagem de 45 °C

Umidade relativa do ar de secagem (%)					
30±1%		40±1%		60±1%	
Tempo (h)	U* (decimal b.s.)	Tempo (h)	U* (decimal b.s.)	Tempo (h)	U* (decimal b.s.)
0,00	0,928	0,00	0,935	0,00	0,927
1,00	0,479	1,00	0,489	1,00	0,542
2,00	0,325	2,00	0,333	2,00	0,382
3,00	0,243	3,00	0,246	3,00	0,296
4,00	0,192	4,00	0,198	4,00	0,236
5,00	0,158	6,00	0,146	8,00	0,151
6,00	0,138	8,00	0,123	10,00	0,137
7,00	0,123	-	-	-	-

QUADRO 3B. Valores médios do teor de água (U, %b.s.) obtidos durante a secagem dos grãos de feijão, para diferentes valores de umidade relativa e temperatura do ar de secagem de 55 °C

Umidade relativa do ar de secagem (%)					
23±1%		30±1%		40±1%	
Tempo (h)	U* (decimal b.s.)	Tempo (h)	U* (decimal b.s.)	Tempo (h)	U* (decimal b.s.)
0,00	0,947	0,00	0,942	0,00	0,956
0,50	0,568	0,50	0,569	0,50	0,603
1,17	0,398	1,25	0,400	1,17	0,418
1,83	0,287	2,42	0,235	2,17	0,275
2,33	0,238	3,42	0,167	3,17	0,192
3,33	0,153	4,92	0,125	4,17	0,145
4,83	0,109	-	-	5,34	0,119

QUADRO 4B. Valores médios do teor de água (U, decimal b.s.) obtidos durante a embebição dos grãos de feijão nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C

Temperatura de embebição (°C)							
20		30		40		50	
Tempo (h)	U (decimal b.s.)	Tempo (h)	U (decimal b.s.)	Tempo (h)	U (decimal b.s.)	Tempo (h)	U (decimal b.s.)
0,00	0,19	0,00	0,19	0,00	0,19	0,00	0,19
0,50	0,72	0,50	0,79	0,50	0,86	0,50	0,85
1,17	1,00	1,17	1,08	1,17	1,16	1,17	1,16
1,84	1,11	1,84	1,18	1,84	1,26	1,84	1,26
2,51	1,18	2,51	1,25	2,51	1,31	2,51	1,31
3,18	1,23	3,18	1,28	3,18	1,35	3,18	1,36
3,85	1,27	3,85	1,33	3,85	1,37	3,85	1,39
4,52	1,30	4,52	1,34	6,15	1,41	6,10	1,43
6,27	1,34	6,27	1,38	7,65	1,41	7,60	1,44
7,77	1,36	7,77	1,41	9,65	1,43	9,60	1,49
9,77	1,38	9,77	1,40	11,87	1,44	12,02	1,50
12,02	1,39	12,10	1,41	26,87	1,49	27,32	1,53
27,10	1,42	27,10	1,42	33,54	1,50	33,99	1,52
33,77	1,43	33,35	1,44	48,50	1,49	-	-
48,60	1,45	48,57	1,45	-	-	-	-

QUADRO 5B. Valores médios do módulo proporcional de deformidade do feijão (Pa) na posição de compressão em repouso (P_1), para diversas deformações (0,0004; 0,0008; 0,0012; 0,0016 e 0,002 m), em função do teor de água (decimal b.s.) e da deformação

Teor de água (decimal b.s.)	Módulo proporcional de deformidade ($\times 10^7$ Pa)				
	0,0004	0,0008	0,0012	0,0016	0,002
0,423	7,80	6,28	6,72	5,09	4,04
0,370	8,12	6,33	7,13	6,33	5,50
0,311	9,41	6,95	7,42	7,86	7,58
0,258	13,42	9,59	9,42	9,55	9,58
0,208	24,56	16,97	15,14	14,11	13,71
0,166	45,72	30,61	25,19	21,93	17,08
0,136	71,28	45,05	34,55	24,71	17,68

QUADRO 6B. Valores médios do módulo proporcional de deformidade do feijão (Pa) na posição de compressão com o hilo na horizontal (P_2), para diversas deformações (0,0004; 0,0008; 0,0012; 0,0016 e 0,002 m), em função do teor de água (decimal b.s.) e da deformação

Teor de água (decimal b.s.)	Módulo proporcional de deformidade ($\times 10^7$ Pa)				
	0,0004	0,0008	0,0012	0,0016	0,002
0,423	4,98	3,08	3,03	3,26	2,60
0,370	5,56	2,47	2,20	2,41	2,85
0,311	7,00	3,67	2,93	2,85	3,14
0,258	11,19	5,74	4,34	3,84	3,87
0,208	20,41	12,16	8,92	7,30	6,44
0,166	34,70	19,59	13,04	10,36	9,28
0,136	56,41	29,66	19,66	12,94	10,41

QUADRO 7B. Valores médios do módulo proporcional de deformidade do feijão (Pa) na posição de compressão com o hilo vertical (P_3), para diversas deformações (0,0004; 0,0008; 0,0012; 0,0016 e 0,002 m), em função do teor de água (decimal b.s.) e da deformação

Teor de água (decimal b.s.)	Módulo proporcional de deformidade ($\times 10^7$ Pa)				
	0,0004	0,0008	0,0012	0,0016	0,002
0,423	7,32	3,11	2,19	1,89	1,89
0,370	7,53	3,33	2,28	1,86	1,71
0,311	8,98	4,38	3,07	2,43	2,09
0,258	11,71	6,30	4,54	3,63	3,07
0,208	18,97	11,18	8,26	6,58	5,16
0,166	31,63	19,07	13,02	7,17	5,10
0,136	48,70	19,77	13,88	10,59	8,01

QUADRO 8B. Valores médios da força de compressão, para o feijão com e sem a presença do inseto-praga, em função das deformações (0,0004; 0,0008; 0,0012 e 0,0016 m) e do período de armazenamento, para a posição P₁

Período de armazenamento (dia)	Força de compressão (N)			
	0,0004	0,0008	0,0012	0,0016
sem inseto-praga				
0	154,48	217,84	246,76	357,59
28	106,83	217,84	347,11	450,47
56	83,25	167,66	288,10	392,63
84	87,28	193,57	319,27	429,19
112	146,15	272,76	396,87	491,91
com inseto-praga				
0	76,99	159,16	260,54	347,82
28	105,06	203,01	315,75	400,40
56	110,20	214,44	325,39	418,67
84	64,43	133,59	215,02	282,76
112	20,75	42,98	71,35	100,00

QUADRO 9B. Valores médios da força de compressão, para o feijão com e sem a presença do inseto-praga, em função das deformações (0,0004; 0,0008; 0,0012 e 0,0016 m) e do período de armazenamento, para a posição P₂

Período de armazenamento (dia)	Força de compressão (N)			
	0,0004	0,0008	0,0012	0,0016
sem inseto-praga				
0	23,89	62,99	102,26	130,49
28	35,16	100,63	124,05	145,93
56	30,84	94,18	123,14	162,45
84	26,07	59,79	89,55	119,38
112	12,71	18,46	26,42	33,51
com inseto-praga				
0	23,89	62,99	102,26	130,49
28	35,16	100,63	124,05	145,93
56	30,84	94,18	123,14	162,45
84	26,07	59,79	89,55	119,38
112	12,71	18,46	26,42	33,51

QUADRO 10B. Valores médios da força de compressão, para o feijão com e sem a presença do inseto-praga, em função das deformações (0,0004; 0,0008; 0,0012 e 0,0016 m) e do período de armazenamento, para a posição P₃

Período de armazenamento (dia)	Força de compressão (N)			
	0,0004	0,0008	0,0012	0,0016
sem inseto-praga				
0	31,20	53,00	73,58	84,30
28	42,94	77,76	104,04	95,56
56	43,40	80,86	108,16	105,21
84	48,43	81,02	87,20	101,20
112	46,84	82,72	79,92	75,75
com inseto-praga				
0	31,20	53,00	73,58	84,30
28	29,25	52,32	76,88	86,71
56	35,48	61,62	90,56	46,98
84	32,14	56,73	76,91	82,32
112	13,22	20,61	28,92	35,89

QUADRO 11B. Valores médios da força de compressão, para o feijão com e sem a presença do inseto-praga, em função das temperaturas de embebição (20, 30, 40 e 50 °C) e do período de armazenamento

Período de armazenamento (dia)	Força de compressão (N)			
	20	30	40	50
sem inseto-praga				
0	55,00	64,71	60,87	71,85
28	55,86	62,59	66,91	80,98
56	57,27	55,38	59,93	78,75
84	58,62	62,82	65,76	85,34
112	64,78	61,49	65,40	81,61
com inseto-praga				
0	55,00	64,71	60,87	71,85
28	62,08	68,71	64,07	80,57
56	57,43	59,36	56,49	88,70
84	59,06	61,36	59,22	64,14
112	39,74	40,49	48,61	52,19

QUADRO 12B. Valores médios da força de compressão, para o feijão com e sem a presença do inseto-praga, em função tempo de cocção (0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minuto) e do período de armazenamento

Período de armazenamento (dia)	Força de compressão (N)						
	0	5	10	15	20	25	30
sem inseto-praga							
0	159,00	80,55	59,60	44,94	49,52	37,25	32,57
28	161,25	112,81	71,60	61,30	55,09	46,37	44,03
56	165,00	92,22	78,74	65,57	65,67	44,39	36,25
84	153,74	135,50	75,46	87,76	71,09	64,34	51,93
112	146,66	126,60	76,64	70,89	43,20	41,56	49,26
com inseto-praga							
0	159,00	80,55	59,60	44,94	49,52	37,25	32,57
28	155,13	112,78	78,55	68,68	49,02	46,22	42,21
56	164,86	93,95	66,22	63,57	60,80	43,93	42,72
84	143,16	87,83	87,50	70,18	67,36	50,41	50,27
112	115,21	89,19	86,98	73,61	72,20	56,00	42,64

QUADRO 13B. Valores médios da força máxima de punção, para o feijão com e sem a presença do inseto-praga, em função das temperaturas de embebição (20, 30, 40 e 50 °C) e do período de armazenamento

Período de armazenamento (dia)	Força máxima de punção (N)			
	20	30	40	50
sem inseto-praga				
0	279,81	286,84	263,42	251,30
28	261,13	257,62	262,25	234,09
56	244,68	261,66	247,86	236,14
84	267,85	257,79	255,35	249,47
112	259,96	259,09	243,46	243,32
com inseto-praga				
0	279,81	286,84	263,42	251,30
28	264,50	266,06	258,53	227,13
56	251,86	252,73	236,48	225,74
84	236,21	226,44	231,12	218,78
112	147,17	155,16	177,14	156,81

QUADRO 14B. Valores médios força máxima de punção, para o feijão com e sem a presença do inseto-praga, em função do tempo de cocção (0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minuto) e do período de armazenamento

Período de armazenamento (dia)	Força máxima de punção (N)						
	0	5	10	15	20	25	30
sem inseto-praga							
0	249,02	118,92	72,80	56,45	47,07	51,47	36,26
28	265,16	128,25	79,08	57,28	50,39	44,44	43,30
56	254,89	137,43	101,66	71,75	59,91	48,82	51,56
84	259,44	136,25	89,83	78,29	70,73	49,83	48,75
112	260,62	135,56	113,57	85,51	78,35	59,05	49,94
com inseto-praga							
0	249,02	118,92	72,80	56,45	47,07	51,47	36,26
28	265,88	136,88	85,44	62,58	48,10	44,39	40,31
56	247,80	132,22	96,62	69,76	58,68	48,10	41,50
84	219,64	110,29	78,09	64,85	51,36	42,87	39,44
112	136,11	93,31	73,34	63,02	49,65	45,54	40,12

APÊNDICE C

Portaria Nº 161 de 24 de julho de 1987 - Ministério da Agricultura

NORMA DE IDENTIDADE, QUALIDADE, APRESENTAÇÃO E EMBALAGEM DO FEIJÃO

4. CLASSIFICAÇÃO

O feijão será classificado em GRUPOS, CLASSES E TIPOS, segundo a espécie, a coloração da película e a qualidade:

4.1. - Grupos

De acordo com a espécie a que pertença, o feijão será classificado em 02 (dois) grupos:

4.1.1. - Grupo I - Feijão anão: quando proveniente da espécie *Phaseolus vulgaris* L.

4.1.2. - Grupo II - Feijão-de-corda (Macaçar): quando proveniente da espécie *Vigna unguiculata* (L) walp.

4.2. - Classes

De acordo com a coloração da película, o feijão anão (Grupo I) será classificado em 04 (quatro), classes e o feijão-de-corda (Grupo II) será classificado em 04 (quatro) Classes, assim identificadas:

4.2.1. - Classes do Grupo I - Feijão anão

4.2.1.1. - Branco - é o produto que contiver, no mínimo, 95% (noventa e cinco por cento) de grãos de coloração branca.

4.2.1.2. - Preto - é o produto que contiver, no mínimo, 95% (noventa e cinco por cento) de grãos de coloração preta.

4.2.1.3. - Cores - constituído de grãos coloridos, admitindo-se, no máximo, 5% (cinco por cento) de mistura de outras classes e até 10% (dez por cento) de outras cultivares da classe cores, desde que apresentem cores contrastantes ou tamanhos diferentes.

4.2.1.4. - Misturado - é o produto que não atender às especificações de nenhuma das classes anteriores, devendo constar, obrigatoriamente, no Certificado de Classificação, as percentagens de cada uma das classes e o percentual da cultivar predominante.

4.2.2. - Classes do Grupo II - Feijão-de-corda (Macaçar)

4.2.2.1. - Brancão - é o produto que contiver, no mínimo, 80% (oitenta por cento) de grãos de coloração branca.

4.2.2.2. - Preto - é o produto que contiver, no mínimo, 80% (oitenta por cento) de grãos na coloração preta.

4.2.2.3. - Cores - constituído de grãos coloridos, admitindo-se, no máximo, 5% (cinco por cento) de mistura das outras classes e até 15% (quinze por cento) de outras cultivares da classe cores, desde que apresentem cores contrastantes ou tamanhos diferentes.

4.2.2.4. - Misturados - é o produto que não atender às especificações de nenhuma das classes anteriores, devendo constar obrigatoriamente no Certificado de Classificação as percentagens de cada uma das classes e o percentual da cultivar predominante.

4.3. - Tipos

O feijão será classificado em 5 (cinco) tipos, de acordo com a qualidade do produto, expresso por números de 1 (um) a 5 (cinco) e definidos, de acordo com os limites máximos de tolerância de defeitos, que estão estabelecidos nos Anexos I e II.

4.4. - Umidade, Impurezas e Matérias Estranhas

4.4.1. - Independente do Grupo e do Tipo do feijão, os teores de Umidade, Impurezas e Matérias Estranhas não poderão exceder aos seguintes limites máximos de tolerância:

UMIDADE: 15%(quinze por cento)

IMPUREZAS E MATÉRIAS ESTRANHAS: 2%(dois por cento)

4.4.2. - Os valores percentuais que excederem aos limites máximos estabelecidos no subitem 4.4.1. poderão ser descontados do peso líquido do lote.

4.5. - Abaixo do padrão

Quando os percentuais de ocorrência de defeitos excederem aos limites máximos de tolerância especificados nos Anexos I e II para o tipo 5(cinco), o feijão será classificado como ABAIXO DO PADRÃO.

4.5.1. - O produto classificado como ABAIXO DO PADRÃO poderá ser:

4.5.1.1. - Comercializado como tal, desde que perfeitamente identificado e cuja identificação esteja colocado em lugar de destaque, de fácil visualização e de difícil remoção.

4.5.1.1.1. - O produto classificado como ABAIXO DO PADRÃO e que apresentar percentual superior a 7,5%(sete e meio por cento) de grãos mofados será, obrigatoriamente, submetido à análise de micotoxinas.

4.5.1.2. - Rebeneficiado, desdobrado ou recomposto, para efeito de enquadramento em tipo;

4.5.1.3. - Reembalado e remarcado para efeito de atendimento às exigências da Norma.

4.6. - Desclassificado

4.6.1. - Será desclassificado o feijão que apresentar uma ou mais das características indicadas abaixo, sendo proibida a sua comercialização para o consumo humano e animal:

4.6.1.1. - Mau estado de conservação;

4.6.1.2. - O índice de micotoxinas superior ao permitido pela legislação vigente, nos casos previstos pelo subitem 4.5.1.1.1. da presente Norma;

4.6.1.3. - Odor estranho;

4.6.1.4. - Substâncias nocivas à saúde.

4.6.2. - Será desclassificado e impedido a sua comercialização, até o beneficiamento ou expurgo para enquadramento em tipo, todo o feijão que apresentar uma das seguintes características:

4.6.2.1. - Presença de bagas de mamona ou outras sementes tóxicas;

4.6.2.2. - Presença de insetos vivos.

4.6.3. - Somente será permitida a utilização do produto desclassificado, para outros fins, após ouvido o Ministério da Agricultura.

ANEXO - I
GRUPO I - FEIJÃO ANÃO

TABELA DE TOLERÂNCIA MÁXIMAS PERCENTUAIS

Tipos	Avariados		Total
	Máximo de ardidos e mofados	Máximo carunchados	
01	1,5%	1,0%	4%
02	3,0%	2,0%	8%
03	4,5%	3,0%	12%
04	6,0%	4,0%	16%
05	7,5%	5,0%	20%