

FERNANDO MENDES BOTELHO

**ABSORÇÃO DE ÁGUA POR GRÃOS DE MILHO COM DIFERENTES
NÍVEIS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA**

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

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2009**

FERNANDO MENDES BOTELHO

**ABSORÇÃO DE ÁGUA POR GRÃOS DE MILHO COM DIFERENTES
NÍVEIS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA**

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

APROVADA: 16 de fevereiro de 2009.

Prof. José Antônio Marques Pereira

Prof. Alexandre Gurgel

Prof. Mauri Martins Teixeira

Dr. Sérgio Lopes Donzeles

Prof. Márcio Arêdes Martins
(Orientador)

Aos meus pais José Arnaldo Rodrigues Botelho e Ana Mendes Botelho e aos meus irmãos Fabiano, Frederico, Flávio e Fabrício pelo exemplo de vida, amor, carinho, confiança, bondade, incentivo e dedicação irrestritos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, luz, saúde, sabedoria e presença constante em toda a minha vida.

Aos Professores Márcio Arêdes Martins e Paulo Cesar Corrêa pela orientação, amizade, oportunidade, conselhos, confiança, ensinamentos e principalmente pelo primordial apoio nesta marcante etapa de minha formação pessoal e profissional.

Ao Professor Paulo Roberto Cecon, pelo auxílio e sugestões.

Ao Professor Tetuo Hara, pelos conselhos, ensinamentos, amizade, sugestões e incentivos, cruciais para minha formação pessoal e profissional e para concretização deste trabalho.

Aos Doutores Osvaldo, Deise, Ana Paula Martinazzo, Fabrízio e André pela amizade e ensinamentos.

Aos amigos da pós-graduação Sílvia, Ana Paula Lelis, Sárvio, Fábria e Bruna pela amizade, incentivo, companheirismo e apoio na condução dos experimentos.

Aos estudantes Cassandra, Emílio, Fernanda, Aline e Felipe, pela amizade e pela ajuda na condução do trabalho.

Aos amigos Gabriel, Rômulo e Jonathas, pela amizade sincera.

Aos amigos Fernando Júnior, Pedro, Edson, Ede, Breno e Bruno, pela amizade irrestrita.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio, união, simplicidade, humildade e presença marcante na minha vida.

Aos meus avós, tios e primos pelo incentivo e apoio.

Aos amigos do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (Centreinar), pela amizade incentivo e apoio constantes.

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

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

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

A todos que de alguma forma contribuíram para que essa importante etapa da minha vida se concretizasse.

BIOGRAFIA

FERNANDO MENDES BOTELHO, filho de José Arnaldo Rodrigues Botelho e Ana Mendes Botelho, nasceu na cidade de Brasília de Minas, estado de Minas Gerais, em 11 de março de 1983.

Em maio de 2002, iniciou o curso de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa (MG), graduando-se em março de 2007. Nesse mesmo mês e ano, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Engenharia Agrícola da UFV, na área de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, submetendo-se à defesa de tese, requisito indispensável para a obtenção do título de *Magister Scientiae*, em fevereiro de 2009.

SUMÁRIO

NOMENCLATURA	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	5
CAPÍTULO 1 - <i>Modelagem da cinética de absorção de água por grãos de milho em diferentes temperaturas e níveis de danificação mecânica</i>	7
1.1 INTRODUÇÃO	7
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	9
1.2.1 <i>Matéria-prima</i>	9
1.2.2 <i>Danificação mecânica</i>	10
1.2.3 <i>Absorção de água pelos grãos de milho</i>	11
1.2.4 <i>Modelagem do processo de absorção de água</i>	11
1.2.5 <i>Análise estatística do modelo</i>	12
1.2.6 <i>Determinação do coeficiente de difusão efetivo</i>	13
1.2.7 <i>Efeito da temperatura</i>	15
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
1.3.1 <i>Nível de danificação mecânica</i>	15
1.3.2 <i>Absorção de água</i>	16
1.3.3 <i>Desempenho do modelo de Peleg na descrição do fenômeno de absorção de água</i>	19
1.3.4 <i>Coeficiente de difusão efetivo</i>	24
1.4 CONCLUSÕES	28
1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
CAPÍTULO 2 - <i>Modelagem da expansão volumétrica e variação das características físicas do milho durante a embebição</i>	32
2.1 INTRODUÇÃO	32
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	34
2.2.1 <i>Matéria-prima</i>	34
2.2.2 <i>Embebição do milho</i>	35
2.2.3 <i>Massa específica aparente e unitária</i>	35
2.2.4 <i>Porosidade</i>	35
2.2.5 <i>Forma e tamanho</i>	36
2.2.6 <i>Expansão volumétrica</i>	38
2.2.7 <i>Análise estatística dos modelos</i>	39

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
2.3.1 <i>Massa específica aparente e unitária</i>	40
2.3.2 <i>Porosidade</i>	43
2.3.3 <i>Forma e tamanho</i>	45
2.3.4 <i>Modelagem da expansão volumétrica</i>	46
2.4 CONCLUSÕES	51
2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
CAPÍTULO 3 - <i>Avaliação das propriedades mecânicas dos grãos de milho submetidos a embebição em diferentes níveis de danificação mecânica</i>	55
3.1 INTRODUÇÃO	55
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	60
3.2.1 <i>Matéria-prima</i>	60
3.2.2 <i>Danificação mecânica</i>	60
3.2.3 <i>Embebição do milho</i>	61
3.2.4 <i>Propriedades mecânicas</i>	62
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
3.3.1 <i>Nível de danificação mecânica dos grãos de milho</i>	64
3.3.2 <i>Propriedades mecânicas</i>	65
3.4 CONCLUSÕES	74
3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
CONCLUSÕES GERAIS	77
Apêndice A	81

NOMENCLATURA

- t : tempo, h;
 θ : tempo, min;
 τ : tempo, s;
- RU : razão de umidade, adimensional;
 r : raio equivalente do produto, m;
 n : número de termos da série de Fourier;
 U^* : teor de água do produto, % b.s.;
 U : teor de água do produto, decimal b.s.;
- D_{ef} : coeficiente de difusão efetivo, $m^2 s^{-1}$;
 D : fator pré-exponencial, $m^2 s^{-1}$;
 E_a : energia de ativação, $kJ mol^{-1}$;
 R : constante universal dos gases, $kJ mol^{-1} K^{-1}$;
 T_a : temperatura de hidratação do milho, K.
 a : maior dimensão característica do grão, mm;
 b : dimensão média característica do grão, mm;
 c : menor dimensão característica do grão, mm;
- C_e : condutividade elétrica, $\mu S cm^{-1} g^{-1}$;
 ϖ : nível de danificação mecânica dos grãos de milho, $\mu S cm^{-1} g^{-1}$;
 F : força, N;
- E_p : módulo proporcional de deformidade; MPa;
 E : módulo de deformidade, Pa;
 ζ : energia, mJ;
 γ : módulo de resiliência, $mJ mm^{-3}$;
 μ : razão de Poisson, adimensional;
- R_c : raio de curvatura no ponto de contato, m;
 χ : deformação total (elástica e plástica) do produto, m;
- SE : desvio padrão da estimativa, % b.s.;
 P : erro médio relativo, %
 ε : porosidade do grão, adimensional;

ρ : massa específica, kg m^{-3} ;
 ϕ : esfericidade, adimensional;
 C : circularidade, adimensional;
 d_i : diâmetro do maior círculo inscrito no produto, mm;
 d_c : diâmetro do maior círculo circunscrito no produto, mm;
 ψ : índice de expansão volumétrica dos grãos, adimensional;
 V_g : volume dos grãos, mm^3 ;
 V : volume aparente da massa de grãos, mm^3 ;
 β : coeficiente linear de expansão, $\text{kg}_{\text{ms}} \text{kg}_a^{-1}$;
 x : deformação, mm;
 S : secante, N mm^{-1} ;
 C_1 : taxa constante de Peleg, $100 \text{ h kg}_{\text{ms}} \text{kg}_a^{-1}$;
 C_2 : capacidade constante de Peleg, $100 \text{ kg}_{\text{ms}} \text{kg}_a^{-1}$;
 Y : valor observado experimentalmente;
 \hat{Y} : valor estimado pelo modelo;
 η : número de dados observados;
 GLR : graus de liberdade do resíduo;
 d, e e f : coeficientes elásticos, N mm^{-1} , N mm^{-2} , N mm^{-3} , respectivamente; e
 λ, φ, α e δ : parâmetros de ajuste dos modelos.

Subscritos

ap : aparente
 u : unitária
 0 : instante inicial
 e : condição de equilíbrio
 t : dado instante de tempo
 ms : matéria seca;
 a : água;

RESUMO

BOTELHO, Fernando Mendes, M.Sc. Universidade Federal de Viçosa, Fevereiro de 2009. **Absorção de água por grãos de milho com diferentes níveis de danificação mecânica.** Orientador: Márcio Arêdes Martins. Co-Orientadores: Paulo Cesar Corrêa e Paulo Roberto Cecon.

O objetivo deste trabalho foi avaliar e modelar o processo de absorção de água em grãos de milho submetidos ao processo de embebição com diferentes níveis de danificação mecânica em diferentes temperaturas, além de determinar e modelar seu comportamento mecânico durante o processamento. Buscou-se ainda estudar o comportamento de algumas propriedades físicas em função do teor de água. Foram utilizados grãos de milho da variedade AG 1510, com teor de água inicial de 0,142 (decimal b.s.) obtidos de um produtor rural da cidade de Viçosa (MG). Induziram-se diferentes níveis de danificação mecânica nos grãos, correlacionando-os com a condutividade elétrica. No processo de embebição foi utilizada uma solução de 0,2 % de dióxido de enxofre (SO₂) e 0,55 % de ácido láctico (C₃H₆O₃) em água destilada, referindo-se ao processamento convencional via úmida dos grãos de milho, nas temperaturas de (40, 50, 60 e 70) °C e com o produto com níveis de danificação mecânica analisados indiretamente pela condutividade elétrica de (2,847; 14,077; 22,261; 29,194 e 32,971) μS cm⁻¹ g⁻¹. Para a modelagem do processo de embebição utilizou-se o modelo de Peleg. O coeficiente de difusão efetivo para o processo de hidratação dos grãos de milho foi obtido pelo ajuste do modelo da difusão líquida baseado na segunda lei de Fick aos dados observados e sua relação com a temperatura foi descrita pela equação de Arrhenius. As massas específicas aparente e unitária, a porosidade, a circularidade, a esfericidade e a expansão volumétrica foram avaliadas para os grãos de milho sem danificação mecânica induzida (testemunha) em função do teor de água. Foram determinadas ainda as propriedades mecânicas: força para uma deformação específica de 0,001 m, módulo proporcional de deformidade, energia necessária para a deformação e o módulo de resiliência avaliando a curva deformação-força para diferentes teores de água e níveis de danificação física. De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que: (a) As alterações estruturais causadas pela danificação mecânica induzida nos grãos de milho alteraram as taxas de absorção de água no produto; (b) O modelo de Peleg se ajustou

adequadamente aos dados observados para todas as condições utilizadas; (c) Os valores do coeficiente de difusão efetivo aumentaram com o aumento da temperatura e do nível de danificação, apresentando valores entre $(2,403 \times 10^{-10}$ e $19,220 \times 10^{-10}) \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; (d) A energia de ativação referente à difusão de água nos grãos de milho variou entre (14,533 e 28,366) kJ mol^{-1} , sendo os maiores valores obtidos quanto mais íntegro fisicamente o produto se apresentava; (e) A porosidade aumentou linearmente até atingir um patamar, e seu comportamento foi descrito por um modelo bi-segmentado. As massas específicas aparente e unitária variaram segundo uma relação quadrática, em que os valores diminuíram até atingir um valor mínimo, quando voltaram a aumentar. A circularidade e a esfericidade dos grãos de milho não variaram com o teor de água; (f) O modelo de Rahman foi o que melhor representou os dados da expansão volumétrica unitária. Nenhum dos modelos tradicionalmente usados para prever a variação volumétrica de produtos agrícolas se ajustou satisfatoriamente aos dados observados da expansão volumétrica aparente dos grãos de milho, sendo proposto um novo modelo; (g) As propriedades mecânicas estudadas diminuíram significativamente com o aumento do teor de água. Os valores encontrados para a força, o módulo proporcional de deformidade, a energia e o módulo de resiliência variaram respectivamente entre (144,60 e 446,1) N; (532,76 e 165,9) MPa; (279,32 e 36,24) mJ e entre (1,4687 e 0,1923) mJ mm^{-3} , para uma faixa de teor de água entre (0,2585 e 0,5878) (decimal b.s.) e níveis de danificação mecânica obtidos indiretamente pela condutividade elétrica variando de (2,8466 a 32,971) $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$; e (h) O modelo sigmoidal, descrito pela série de Taylor, descreveu satisfatoriamente os dados da relação deformação-força exibida pelos grãos de milho para teores de água inferiores a 0,57 (decimal b.s.).

ABSTRACT

BOTELHO, Fernando Mendes, M.Sc. Universidade Federal de Viçosa, February, 2009. **Water Absorption Corn Grain At Different Mechanical Damage Levels.** Adviser: Márcio Arêdes Martins. Co-Advisers: Paulo Cesar Corrêa and Paulo Roberto Cecon.

The aim of this work was to evaluate and model the water absorption process of corn grain submitted to soaking process at different levels of mechanical damage at different temperatures, as well to determinate and model its mechanical behavior during the process. Behavior of some physical properties was investigated in function of moisture content. Corn grain of AG 1510 variety were utilized, with initial moisture content of 0.142 (decimal d.b.) obtained at a small producer from Viçosa (MG) city area. Different mechanical damage levels were induced at grains, correlating with electrical conductivity. At soaking process, solution of 0.2 % of sulfur dioxide (SO₂) and 0.55 % of lactic acid (C₃H₆O₃) in distilled water were used, referring to wet milling conventional process of corn grain, at temperatures of (40, 50, 60 and 70) °C and mechanical damage levels analyzed indirectly through electrical conductivity of (2.847, 14.077, 22.261, 29.194 and 32.971) μS cm⁻¹ g⁻¹. Soaking process modeling was performed by Peleg's model. Effective diffusivity coefficient to hydration process of corn grain was obtained through observed data adjustment of liquid diffusivity model based on Fick's second law, and its relationship with temperature was described by Arrhenius equation. Bulk and real densities, porosity, circularity, sphericity and volumetric expansion were evaluated to corn grain without induced mechanical damage (witness) in function of moisture content. Mechanical properties were also determined: force to a specific deformation of 0.001 m, proportional deformity modulus, deformation energy and resilient modulus, evaluating the force-deformation curve, to different moisture content and physical damage levels. Was concluded, according to obtained results: (a) structural alterations caused by induced mechanical damage at corn grain altered product water absorption rates; (b) Peleg's model adequately adjusted to observed data to entire conditions utilized; (c) effective diffusivity coefficients values increased with temperature and damage level increase, presenting magnitudes between (2.403 × 10⁻¹⁰ and 19.220 × 10⁻¹⁰) m² s⁻¹; (d) activation energy referred to water diffusivity of corn grain varied from (14.533 to 28.366) kJ mol⁻¹, being

that higher values is correlated to higher product physical integrity; (e) porosity increased linearly until achieve a certain level, and its behavior was described by a bi-segmented model. Bulk and real densities varied by a quadratic relation, where by values decreased until attain a minimal value, increasing afterwards. Circularity and sphericity of corn grain didn't varied with moisture content; (f) Unit volumetric expansion was best represented by Rahman's model. None of the conventional models used to predict volumetric variation of agricultural products adjusted satisfactorily to apparent volumetric expansion observed data of corn grain, therefore a new model was proposed; (g) The mechanical properties evaluated decreased significantly only with regard to moisture content variation. Force, proportional deformity modulus, energy and resilient modulus values acquired varied respectively between (446.1 and 144.60) N; (532.76 and 165.9) MPa; (279.32 and 36,24) mJ, and (1.4687 and 0.1923) mJ mm⁻³, with the moisture content ranging from (0.2585 to 0.5878) (decimal d.b.) and mechanical damage level obtained indirectly through electrical conductivity between (2.8466 and 32.971) $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$; (h) sigmoid model, expressed by Taylor series, satisfactorily described the force-deformation relationship data displayed by corn grain with a moisture content below 0.57 (decimal d.b.).

INTRODUÇÃO GERAL

A safra 2007/2008 de grãos foi uma das maiores na história do Brasil, atingindo uma marca em torno de 140,7 milhões de toneladas, com destaque para o milho e a soja, que respondem por aproximadamente 40 % e 43 % deste total, respectivamente (CONAB, 2008). Todavia, diferentemente da soja cuja produção visa ao mercado externo, praticamente toda a produção de milho é voltada para o consumo interno.

O Brasil é o terceiro maior produtor de milho do mundo, ficando atrás apenas dos Estados Unidos e da China. Minas Gerais destaca-se como um dos maiores estados produtores no Brasil, juntamente com os estados do Paraná, Rio Grande do Sul e Mato Grosso. Levando-se em consideração a produção do milho safra (1ª safra) e safrinha (2ª safra) no período 2006/07, Minas Gerais foi o segundo maior produtor nacional deste grão, respondendo por 12,2 % do total produzido no país e se destacando principalmente na produção do milho safra (Anuário Brasileiro do Milho, 2007).

O milho é uma cultura de variada aplicação sendo utilizado tanto em pequenas quantidades na alimentação humana como em grandes quantidades na alimentação animal. A maior demanda brasileira desse produto é para a alimentação animal (principalmente suínos, aves e bovinos), com o consumo variando entre (60 e 80) % do total produzido, seguido pela indústria moageira que demanda em torno de 10 % do total consumido no país (EMBRAPA, 2008; ABIMILHO, 2008).

O processamento industrial do milho visa a separar o grão em suas partes principais: germe, amido, proteína e fibras. O processo segue então por duas vias: moagem úmida e moagem seca. No processo a seco, são obtidos produtos tais como: canjica, canjicas para cereais matinais e para produção de pipocas expandidas, “*gritz*” de milho, óleo de milho

bruto e refinado e a sêmola de milho. Esse processo não requer muita tecnologia e também não gera muitos produtos sofisticados. Os derivados tecnologicamente superiores são oriundos do processamento via úmida. Os produtos obtidos pela moagem úmida possuem maior valor agregado, respondendo por cerca de 30 % das indústrias de milho (CRA, 2008; ABIMILHO, 2008).

As principais etapas do processamento convencional do milho por via úmida são: limpeza, maceração (hidratação ou embebição), primeira moagem, separação das fibras, segunda moagem e separação do glúten e do amido. As transformações químicas e bioquímicas que ocorrem no milho e que são necessárias ao processo de separação do milho em suas frações principais como ativação de proteases e reações de quebra das redes de proteína que envolvem os grânulos de amido dentro do endosperma, ocorrem durante a maceração, sendo este considerado o estágio mais importante do processo (Lopes Filho et al., 2006; Haros et. al., 2006).

Na maceração, os grãos são embebidos em tanques de aço inox contendo uma solução de água com 0,1 % a 0,2 % de dióxido de enxofre (SO₂) e 0,55 % de ácido láctico (C₃H₆O₃) numa temperatura de subgelatinização de (45 a 55) °C por um período de 24 h a 60 h (Dowd, 2003; Lopes Filho et al., 2006; Haros et al., 2003; Perez et al., 2003). A hidratação do milho nessas condições favorece o processo de moagem. O dióxido de enxofre e a elevada temperatura de maceração são usados para inibir o crescimento microbiano como também solubilizar, desnaturar e dispersar a matriz proteica que envolve os grânulos de amido; já o ácido láctico facilita a difusão do dióxido de enxofre, além de proporcionar um maior amolecimento interno do grão por facilitar a quebra da sua parede celular (Perez et al., 2003; Lopes Filho et al., 2006; Perez et al., 2001; Gowen et al., 2007). Durante a maceração, os componentes solúveis são extraídos do grão. Ao se concluir a fase de maceração, a água é drenada e concentrada em evaporadores de múltiplos efeitos para produzir o líquido concentrado. Este extrato rico em proteínas pode ser usado como um nutriente para microrganismos na produção de enzimas, antibióticos e outros produtos de fermentação. A maior parte, contudo, é combinada com as fibras e o glúten na produção de ingredientes para rações animais. A seguir, os grãos de milho já amolecidos passam por moinhos de baixo atrito, são quebrados, perdem a película e liberam o germe do endosperma. A água é adicionada aos moinhos, resultando em uma grossa massa fluida de grãos macerados e germe integral (CRA, 2008).

A maior fonte de amido para a indústria é obtida pelo processamento via úmida do milho, sendo a maceração uma etapa chave para a eficiência do processo (Haros et al., 2003). A etapa de maceração também é relatada como sendo a de maior custo e a que desprende maior tempo no processo, devido principalmente à resistência do pericarpo e da camada de aleurona do grão à absorção de água e de dióxido de enxofre (Perez et al., 2003, Haros et al., 2006).

Muitos estudos relacionados à etapa de maceração de grãos para diversos produtos agrícolas submetidos ao processamento por via úmida têm sido desenvolvidos tais como: mourisco (Zheng et al., 1998), trigo (Sayaslan, 2004), arroz (Chiang e Yeh, 2002) sorgo (Buffo et al., 1998) e principalmente milho (Haros e Suarez, 1997; Perez et al., 2003; Haros et al., 2003; Haros et al., 2006; Lopes Filho et al., 2006; Ramirez et al., 2008). Nesses estudos tem-se verificado a importância dos fatores que afetam a maceração, como a temperatura e o tempo de processamento, concentração de ácido lático e dióxido de enxofre na solução de maceração, temperatura de secagem e tamanho da partícula do milho.

Apesar de já se conhecer que a maceração é a etapa que demanda maior tempo no processamento por via úmida do milho e que este fato é devido principalmente a limitações físicas impostas pela estrutura interna do grão, poucos são os estudos encontrados na literatura relacionando o fenômeno de absorção com o nível de danificação dos grãos de milho.

Embora imprescindível no processo produtivo de grandes culturas, a colheita mecânica é a principal fonte de danificação dos grãos. Os esforços de compressão e abrasão e os impactos que normalmente ocorrem durante a operação de colheita de grãos e sementes podem acarretar desde danos imperceptíveis a olho nu até a quebra dos grãos, que vão afetar sua qualidade física e fisiológica, não só no armazenamento como também no seu processamento durante a industrialização, como a maceração.

Sendo assim, é importante verificar qual a influência da integridade física do grão de milho no processo de absorção de água, pois praticamente todo o grão destinado à indústria é proveniente da colheita mecanizada.

Os processos de secagem seguidos de reidratação podem levar a alterações na estrutura, na composição química e nas propriedades físicas e térmicas dos produtos agrícolas. Assim, a taxa de reidratação, por depender da integridade física dos produtos submetidos a esse processo, pode ser considerada uma forma de avaliar as injúrias causadas aos alimentos durante as diferentes etapas do seu processamento. Alguns trabalhos visam

quantificar as mudanças físicas causadas pelo processo de hidratação, como Gowen et al. (2007), que estudaram o processo de embebição em grão de bico, verificando que a textura dos grãos diminui de forma expressiva ao longo do processo de absorção e Lucas et al. (2007), que verificaram a taxa de lixiviação de solutos durante o processo de embebição em cereais matinais, dentre outros.

Durante a embebição, a água é transportada para o interior do grão por difusão, promovendo um aumento do seu volume. Esta expansão volumétrica pode ocorrer diferentemente nas dimensões características dos grãos (Bayram et al., 2004), sendo influenciada, principalmente pela temperatura da solução de embebição. O conhecimento da variação volumétrica dos produtos submetidos ao processo de embebição em soluções aquosas é de fundamental importância em projetos de plantas de processamento e na otimização dos processos operacionais (Muramatsu et al., 2006).

Como as condições de embebição são dependentes das particularidades do produto em estudo, torna-se necessário caracterizar e otimizar essas condições. Assim a absorção de água durante a embebição necessita ser predita como função do tempo e da temperatura (Abu-Ghannam e Mckenna, 1997). A quantidade de água absorvida e a taxa com que esse fenômeno ocorre durante o processo de hidratação são devidas principalmente ao tempo de embebição e à temperatura da solução de embebição.

Os modelos matemáticos são essenciais para prever e simular o comportamento dos materiais submetidos a determinado processo (Resende e Corrêa, 2007). Nos processos passíveis de ser modelados como a hidratação, por exemplo, pode-se utilizar dois tipos de modelos: os teóricos e os empíricos. O primeiro tipo é baseado em fundamentos teóricos, e são mais complexos e envolvem parâmetros que não são adequados para práticas computacionais na maioria das situações (Maskan, 2002). Já os modelos empíricos, apesar de não possuírem fundamentação teórica, são mais simples e de fácil aplicação. O método empírico é um método de abordagem com base em dados experimentais, na análise dimensional e na análise estatística.

O processo de embebição em grãos de milho é bastante estudado, principalmente no que se refere à modelagem do fenômeno de hidratação e da importância dos solutos presentes na solução de embebição, dos efeitos da temperatura e do tempo de duração do processo na qualidade dos subprodutos finais, principalmente amido. No entanto, escassas são as informações que abordam o comportamento físico e a influência da danificação estrutural dos grãos de milho durante o processo de maceração.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho estudar e modelar as curvas de hidratação, analisar o comportamento de algumas propriedades físicas, além de verificar a influência da danificação mecânica na textura dos grãos de milho durante o processo de embebição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIMILHO – Associação Brasileira das Indústrias Moageiras de Milho. Estatísticas. Disponível em: www.abimilho.com.br. Acesso em: abril 2008.

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.

ANUÁRIO BRASILEIRO DO MILHO 2007 – Santa Cruz do Sul (SC), Ed. Gazeta Santa Cruz, 136 p. 2007.

BAYRAM, M.; KAYA, A.; ÖNER, M. D. Changes in properties of soaking water during production of soy-bulgur. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 221 - 230, 2004.

BUFFO, R. A.; WELLER, C. L.; PARKHURST, A. M. Wet-milling factors of sorghum and relationship to grain quality. **Journal of Cereal Science**, v. 27, p. 327 - 334, 1998.

CHIANG, P. Y.; YEH, A. I. Effect of soaking on wet-milling of rice. **Journal of Cereal Science**, v. 35, p. 85 - 94, 2002.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Prospecção para safra 2007/08. Disponível em: www.conab.gov.br. Acesso em: maio 2008.

CRA – Corn Refiners Association U.S.. Disponível em <http://www.corn.org>. Acesso em: dezembro 2008.

DOWD, M. K. Improvements to laboratory-scale maize wet-milling procedures. **Industrial Crops and Products**, v. 18, p. 67 - 76, 2003.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Cultura do milho. Disponível em: www.cnpms.embrapa.br. Acesso em abril 2008.

GOWEN, A.; ABU-GHANNAM, N.; FRIAS, J.; OLIVEIRA, J. Modelling the water absorption process in chickpeas (*Cicer arietinum* L.) – The effect of blanching pre-treatment on water intake and texture kinetics. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 810 - 819, 2007.

HAROS, M.; BLASZCZAK, W.; PEREZ, O. E.; SADOSKA, J.; ROSELL, C. M. Effect of ground corn steeping on starch properties. **European Food Research Technology**, v. 222, p. 194 - 200, 2006.

HAROS, M.; TOLOBA, M. P.; SUAREZ, C. Influence of corn drying on its quality for the wet-milling process. **Journal of Food Engineering**, v. 60, p. 177 - 184, 2003.

HAROS, M.; SUAREZ, C. Effect of drying, initial moisture and variety in corn wet milling. **Journal of Food Engineering**, v. 84, p. 473 - 481, 1997.

LOPES FILHO, J. F.; RAMOS, A. P.; ROMERO, J. T. Difusividade da água, dióxido de enxofre e ácido láctico em grãos de milho durante a maceração para o processo de moagem úmida. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 9 (4), p. 257 - 263, 2006.

LUCAS, T.; RAY, D. L.; MARIETTE, F. Kinetics of water absorption and solute leaching during soaking of breakfast cereals. **Journal of Food Engineering**, v. 80, p. 377 - 384, 2007.

MASKAN, M.; Effect of processing on hydration kinetics of three wheat products of the same variety. **Journal of Food Engineering**, v. 52 p. 337 - 341, 2002.

MURAMATSU, Y.; TAGAWA, A.; KASAI, T.; TAKEYA, K. Volume changes of changes of wheat and barley soaking in water. **Journal of Food Engineering**, v. 73, p. 364 - 369, 2006.

PEREZ, O. E.; HAROS, M.; SUAREZ, C.; ROSELL, C. M. Effect of steeping on the starch properties from ground whole corn. **Journal of Food Engineering**, v. 60, p. 281 - 287, 2003.

PEREZ, O. E.; HAROS, M.; SUAREZ, C. Corn steeping: Influence of time and lactic acid on isolation and properties of starch. **Journal of Food Engineering**, v. 48, p. 251 - 256, 2001.

RAMIREZ, E. C.; JONHSTON, D. B.; MCALOON, A. J.; YEE, W.; SINGH, V.; Engineering process and cost model for a conventional corn wet milling facility. **Industrial Crops and Products**, v. 27, p. 91 - 97, 2008.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C. Modelagem matemática do processo de hidratação de sementes de feijão, **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 29, p. 373 - 378, 2007.

SAYASLAN, A. Wet-milling wheat flour: Industrial processes and small-scale test methods. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v. 37, p. 499 - 515, 2004.

ZHENG, G. H.; SOSULSKIB, F. W.; TYLER, R. T. Wet-milling, composition functional properties of starch and protein isolated from buckwheat groats. **Food Research International**, v. 30 (7), p. 493 - 502, 1998.

CAPÍTULO 1

Modelagem da cinética de absorção de água por grãos de milho em diferentes temperaturas e níveis de danificação mecânica

1.1 INTRODUÇÃO

A maceração (embebição ou hidratação) é uma operação muito importante no processamento de alguns produtos agrícolas, pois nela ocorrem mudanças morfológicas que são determinantes para todas as etapas subsequentes e conseqüentemente para a qualidade final do produto. A maceração é uma das principais etapas do processamento do milho por via úmida. Esse tipo de processamento visa a separar os grãos de milho em suas partes principais (amido, proteína, gérmen e fibras). Comercialmente, os grãos são embebidos em uma solução de (0,1 a 0,2) % de dióxido de enxofre (SO_2) e 0,55 % de ácido láctico ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$) em água, durante um tempo de (24 a 60) h sob temperatura controlada entre (45 e 55) °C (Dowd, 2003; Lopes Filho et al., 2006; Perez et al., 2003).

Muitos estudos referentes à etapa de maceração no processamento industrial convencional de grãos de milho foram desenvolvidos, tendo-se verificado, principalmente, os fatores que afetam o rendimento e a qualidade do amido e a difusão de água nos grãos como temperatura e tempo do processo, temperatura de secagem do grão, tamanho da partícula e concentração de ácido láctico e dióxido de enxofre na solução de embebição, além da modelagem do processo e desenvolvimento de *softwares* para auxiliar neste

processo (Haros e Suarez, 1997; Perez et al., 2003; Haros et al., 2003; Haros et al., 2006; Lopes Filho et al., 2006; Ramirez et al., 2008).

Para que ocorra movimentação de água em grãos, é necessário, basicamente, que exista uma força motriz, ou seja, um gradiente de concentração de água entre a superfície e o interior do produto. Todavia, o mecanismo pelo qual a difusão ocorre nos produtos agrícolas é muito complexo devido à diversidade da composição química e estrutura física desses produtos. Apesar de já se conhecer que a maceração é a etapa que demanda maior tempo no processamento do milho por via úmida, e que este fato é devido principalmente a limitações físicas impostas pela estrutura interna do grão, poucos são os estudos encontrados na literatura especializada relacionando o fenômeno de absorção com o nível de danificação dos grãos de milho.

Conhecer os fatores que interferem na absorção de água em alimentos torna-se prática importante visto a relevância desse fenômeno no processamento industrial de alguns produtos agrícolas e a atenção que esses fatores requerem durante a modelagem desse processo. Para projetos que envolvam o desenvolvimento e/ou aperfeiçoamento de equipamentos utilizados no processo de hidratação de grãos, é de fundamental importância a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a adsorção e absorção de água.

Os modelos utilizados para modelagem do processo de absorção de água normalmente são de dois tipos: teóricos e empíricos. Os modelos teóricos normalmente utilizados baseiam-se na segunda lei de Fick, também conhecida como teoria da difusão líquida. As curvas de absorção obtidas experimentalmente, sob condições controladas, fornecem informações sobre o mecanismo de transporte de água e são utilizadas para determinação do coeficiente de difusão.

Uma vez que os modelos baseados na segunda lei de Fick não são rigorosamente representativos dos diversos mecanismos que prevalecem no transporte de água em produtos agrícolas, o coeficiente de difusão determinado é considerado aparente ou efetivo (Roca et al., 2008). Outro fator que contribui para a complexidade do mecanismo da difusão é a diversidade da composição química e a estrutura física anisotrópica dos produtos. Desta forma, os dados disponíveis na literatura especializada apresentam elevada variação nos seus valores, não só devido à complexidade dos produtos, como também dos diferentes métodos de estimação, tipo de material, teor de água, processo de secagem e metodologia utilizada para sua obtenção (Zogzas et al., 1996).

Os modelos empíricos, apesar de normalmente não possuírem uma fundamentação teórica, geralmente são mais simples, de fácil aplicação e se ajustam bem aos dados experimentais. Dentre os empíricos, o modelo não exponencial de dois parâmetros proposto por Peleg (1988) vem sendo utilizado de forma satisfatória por diversos pesquisadores para prever a cinética de absorção de água em diversos alimentos, como feijão (Resende e Correa, 2007; Abu-Ghannam e McKenna, 1997), grãos-de-bico (Turhan et al, 2002), amaranto (Resio et al., 2006), trigo (Maskan, 2002) ou produtos industrializados como macarrão penne (Cunningham et al., 2007).

Poucas são as informações existentes na literatura especializada relacionando o processo de maceração com a integridade física dos produtos agrícolas. Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho:

- Verificar a influência da danificação mecânica dos grãos de milho no processo de absorção de água;
- Estudar e modelar o processo de embebição de água pelos grãos de milho com diferentes níveis de danificação em diferentes temperaturas; e
- Determinar o coeficiente de difusão efetivo da água no milho e sua relação com a temperatura e com o grau de danificação mecânica do produto.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado 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).

1.2.1 Matéria-prima

Foram utilizados no experimento grãos de milho da cultivar AG 1510, adquiridos de um produtor rural da região de Viçosa (MG). Os grãos foram colhidos e debulhados manualmente a fim de evitar ao máximo sua danificação mecânica. Depois foram submetidos a um processo de limpeza com uso de peneiras, tendo sido retiradas as impurezas, grãos defeituosos e materiais estranhos.

O produto possuía inicialmente um teor de água de 0,250 (decimal b.s.) e foi submetido à secagem sob condições controladas com ar a 45 °C, até um teor de água de 0,142 (decimal b.s.). O teor de água foi determinado em estufa com circulação forçada de ar a 105 ± 1 °C por 24 h em três amostras de 40 g, segundo Brasil (1992), com modificações.

1.2.2 Danificação mecânica

Para a indução da danificação mecânica nos grãos de milho, foi utilizado como fonte impactadora um *Stein Breakage Tester*, modelo CK2-M (Figura 1.1). Esse aparelho possui um cilindro de aço e uma hélice central que gira em rotação constante de 1800 rpm, e que, ao girar, lança o produto contra a parede do cilindro promovendo impacto e esforço de abrasão.

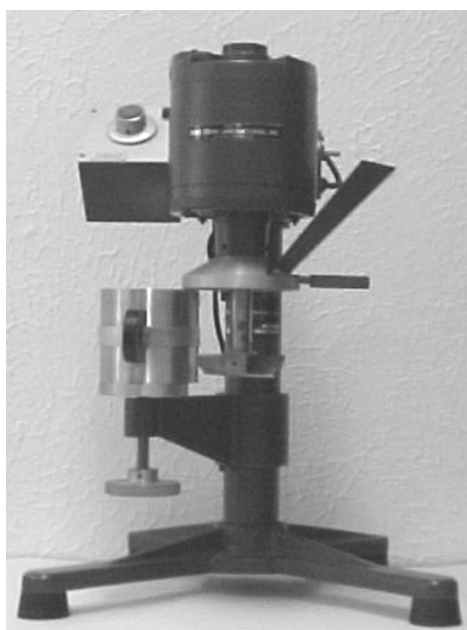


Figura 1.1: *Stein Breakage Tester* usado na simulação dos danos mecânicos.

As amostras de milho foram submetidas à danificação mecânica nos tempos de [0 (testemunha), 1, 2, 3 e 4] min.

O nível de danificação mecânica foi avaliado pelo processo de condutividade elétrica da solução dos exudados dos grãos de milho. Para este teste, foram contadas e pesadas quatro subamostras de cinquenta 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 h. Depois desse período, foram efetuadas as medidas de condutividade elétrica nas soluções com as amostras por meio de um condutivímetro portátil da marca Digimed, modelo DM3.

1.2.3 Absorção de água pelos grãos de milho

Para o processo de absorção de água (hidratação, maceração ou embebição), foram utilizadas amostras de 40 g de milho em três repetições. Essas amostras foram colocadas em frascos herméticos de 150 mL contendo uma solução de 0,2 % de dióxido de enxofre (SO₂) e 0,55 % de ácido láctico (C₃H₆O₃), em água destilada, proporcionando uma razão entre produto e solução de aproximadamente 1:3. A solução e a proporção utilizadas para o processo de hidratação referem-se à etapa de maceração convencional a que o milho é submetido no processamento via úmida, sendo essa relação de pelo menos 1:2. A solução foi obtida adicionando 5,9 g de metabissulfito de sódio (Na₂S₂O₅) e 11 mL de ácido láctico (C₃H₆O₃) a 2 L de água destilada (Lopes Filho et al., 2006).

As amostras foram submetidas à embebição nas temperaturas controladas de (40, 50, 60 e 70) °C e suas massas foram medidas com balança digital com resolução de 0,01 g, em intervalos de tempo predeterminados de 12 h ou até que o grão atingisse o teor de água no equilíbrio. Foi utilizado um conjunto de três amostras independentes para cada tempo de leitura.

1.2.4 Modelagem do processo de absorção de água

Para a modelagem do processo de absorção de água pelos grãos de milho nas diferentes temperaturas propostas foi utilizado o modelo empírico de Peleg (1988) descrito pela Equação 1.1.

$$U_t^* = U_0^* \pm \frac{t}{(C_1 + C_2 t)} \quad (1.1)$$

em que:

U_t^* : teor de água do produto para um dado instante de tempo, % b.s.;

U_0^* : teor de água do inicial do produto, % b.s.;

t : tempo, h;

- C_1 : taxa constante de Peleg, $100 \text{ h kg}_{\text{ms}} \text{ kg}_a^{-1}$; e
 C_2 : capacidade constante de Peleg, $100 \text{ kg}_{\text{ms}} \text{ kg}_a^{-1}$.

O sinal “±” apresentado na Equação 1.1 é devido ao fato de o modelo poder ser empregado tanto em processos de absorção ou adsorção (+) como de dessorção (-).

As constantes C_1 e C_2 do modelo proposto para modelagem de absorção de água pelos grãos de milho foram obtidas pelo ajuste da Equação de Peleg linearizada, conforme descrito na Equação 1.2.

$$\frac{t}{U_t^* - U_0^*} = C_1 + C_2 t \quad (1.2)$$

Uma vantagem do modelo de Peleg é o ganho de tempo para prever a cinética de absorção de água em alimentos, incluindo a predição do teor de água no equilíbrio (Peleg, 1988), que pode ser obtido pela Equação 1.1 quando o tempo tende ao infinito, resultando na Equação 1.3:

$$U_e^* = U_0^* + \frac{1}{C_2} \quad (1.3)$$

em que:

- U_0^* : teor de água inicial do produto, % b.s.;
 U_e^* : teor de água de equilíbrio do produto, % b.s.; e
 C_2 : capacidade constante de Peleg, $100 \text{ kg}_{\text{ms}} \text{ kg}_a^{-1}$.

1.2.5 Análise estatística do modelo

Para verificar o grau de ajuste do modelo, foram consideradas as magnitudes do coeficiente de determinação (R^2) do erro médio relativo (P) e do desvio padrão da estimativa (SE). Os valores do erro médio relativo e do desvio padrão da estimativa para cada modelo foram calculados pelas Equações 1.4 e 1.5, respectivamente:

$$P = \frac{100}{\eta} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (1.4)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (1.5)$$

em que:

Y : valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor estimado pelo modelo;

η : número de dados observados; e

GLR : graus de liberdade do resíduo (número de dados observados menos o número de parâmetros do modelo).

1.2.6 Determinação do coeficiente de difusão efetivo

O coeficiente de difusão efetivo foi obtido por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida, descrito pela Equação 1.6, aos dados experimentais da hidratação do milho. Essa equação é a solução analítica pela série de Fourier para a segunda lei de Fick, desconsiderando a expansão volumétrica do produto e considerando a forma geométrica esférica e a condição de contorno de teor de água conhecida na superfície do produto.

$$RU = \frac{U_t - U_e}{U_0 - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\frac{n^2 \pi^2 D_{ef} \tau}{r^2}\right] \quad (1.6)$$

em que:

RU : razão de umidade, adimensional;

r : raio equivalente do produto, m;

D_{ef} : coeficiente de difusão efetivo, $m^2 s^{-1}$;

n : número de termos da série;

τ : tempo, s;

U_t : teor de água do produto para um dado tempo, decimal b.s.;

U_0 : teor de água do produto no tempo zero, decimal b.s.; e

U_e : teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.s.

A solução analítica dessa equação apresenta-se na forma de uma série infinita de rápida convergência. Desta forma, um número finito de termos (n) pode ser utilizado para uma precisão especificada.

Para determinar o raio equivalente, considerou-se uma amostra de cinquenta grãos de milho em que foram feitas medidas nas suas dimensões características, por meio de um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm.

Para o cálculo do volume, os grãos de milho foram assumidos como sendo conoesféricos (similar a uma gota de um líquido), possuindo uma base esférica com superfície plana e um cone de base arredondada na porção de corte da esfera, de acordo com o esquema apresentado na Figura 1.2 (Jain e Bal, 1997).

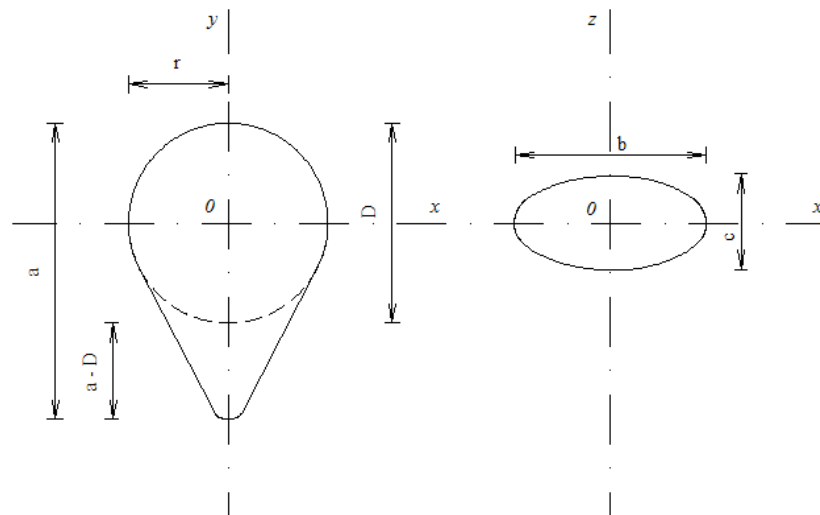


Figura 1.2: Forma cono-esférica dos grãos de milho.

O volume dos grãos de milho foi estimado pela Equação 1.7:

$$V_g = \frac{\pi a^2 (bc)}{6 \left[2a - (bc)^{1/2} \right]} \quad (1.7)$$

em que:

V_g : volume do grão, mm^3 ;

a : maior dimensão característica do grão, mm;

b : dimensão média característica do grão, mm; e

c : menor dimensão característica do grão, mm.

1.2.7 Efeito da temperatura

A expressão de Arrhenius, Equação 1.8, é clássica em diversos estudos de termodinâmica e cinética (Resio et al., 2003; Addo et al., 2006; Bello et al., 2007; Gely e Giner, 2007). Pela sua estrutura, é fácil observar que um gráfico de $\ln(D_{ef})$, em função do inverso da temperatura (T^{-1}), fornece uma reta cujo coeficiente angular pode estimar o valor da energia de ativação para determinado experimento.

$$D_{ef} = D \exp\left(\frac{-E_a}{R T_a}\right) \quad (1.8)$$

em que:

D_{ef} : coeficiente de difusão efetivo, $m^2 s^{-1}$;

D : fator pré-exponencial, $m^2 s^{-1}$;

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

R : constante universal dos gases, $kJ mol^{-1} K^{-1}$; e

T_a : temperatura de embebição do milho, K.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1 Nível de danificação mecânica

O teste de condutividade elétrica é frequentemente empregado para avaliar a qualidade fisiológica de grãos e sementes, uma vez que este teste tem uma relação direta com a integridade física desses produtos. Esse índice relata de forma indireta qual o nível de danificação estrutural ou celular que determinado produto apresenta pela determinação da quantidade de lixiviados na solução de embebição. Na Figura 1.3 estão apresentados os valores médios da condutividade elétrica obtidos a partir da danificação mecânica induzida nos grãos de milho.

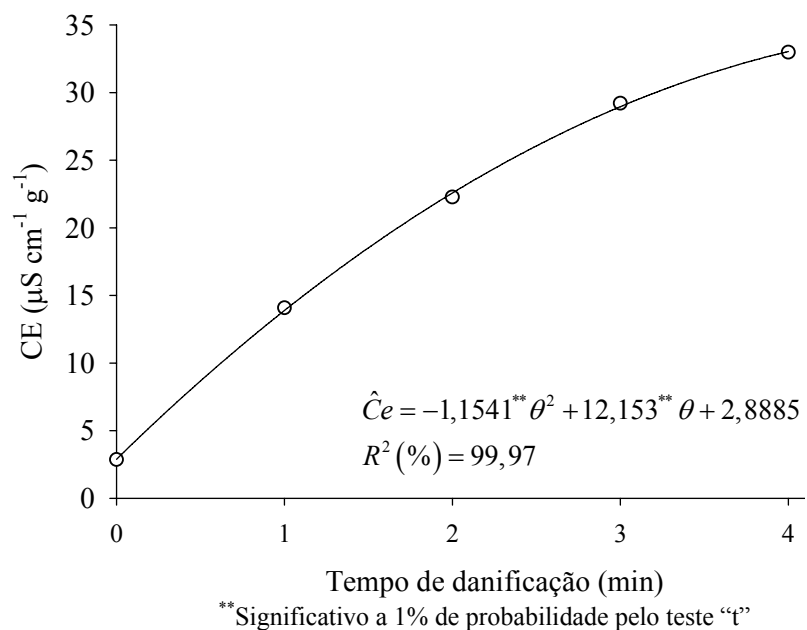


Figura 1.3: Valores médios da condutividade elétrica (CE) dos grãos de milho submetidos a [0 (testemunha) 1, 2, 3 e 4] min de danificação mecânica.

Os valores da condutividade elétrica aumentaram significativamente numa relação quadrática com o aumento do tempo de danificação dos grãos de milho. Esses valores são exatamente (2,847; 14,077; 22,261; 29,194 e 32,971) $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$, para os tempos de (0, 1, 2, 3 e 4) min respectivamente. Verifica-se, pela significância dos parâmetros do modelo e pelo alto valor do coeficiente de determinação ($R^2 > 99,97\%$), que houve uma clara correspondência entre os diferentes tempos de danificação mecânica induzida e os valores de condutividade elétrica.

Os valores da condutividade elétrica aumentaram mais de 11,5 vezes, considerando a testemunha e o máximo nível de danificação induzida, podendo assim ser verificado que o teste proposto para induzir a danificação mecânica nos grãos de milho teve resultados satisfatórios. Valores nessa faixa de condutividade também foram observados por Fessel et al. (2006) para grãos de milho armazenados entre doze e dezesseis meses numa temperatura de 30 °C.

1.3.2 Absorção de água

Na Figura 1.4 estão apresentados os valores observados da variação do teor de água nos grãos de milho ao longo do processo de embebição, para diferentes temperaturas utilizadas e diferentes níveis de danificação mecânica do produto.

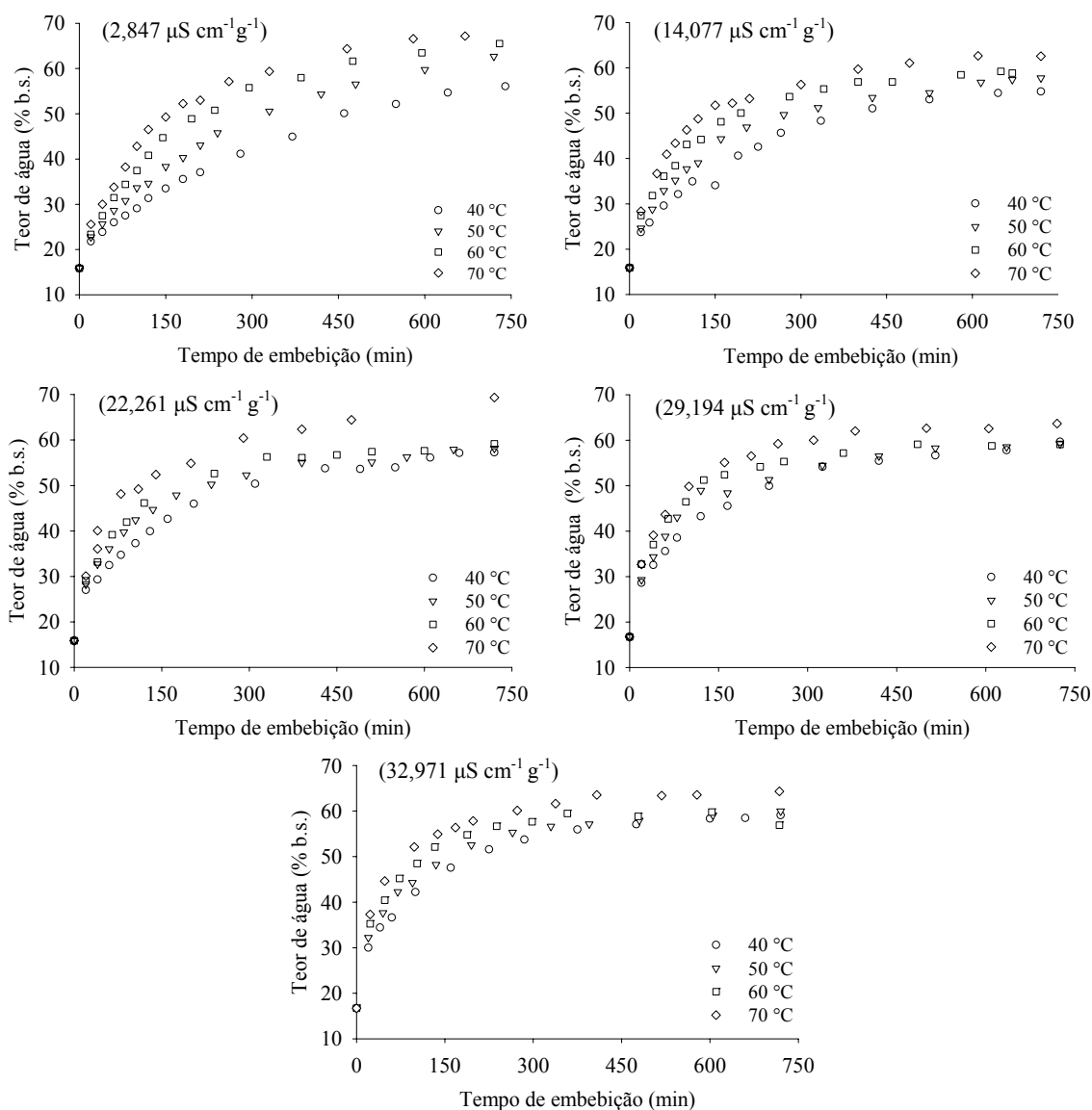


Figura 1.4: Valores observados do teor de água ao longo do tempo para as diferentes temperaturas e níveis de danificação mecânica dos grãos de milho.

Como pode ser observado na Figura 1.4, os grãos de milho apresentaram um comportamento característico para a absorção de água durante o processo de embebição. O início do processo exibe uma alta taxa de absorção de água, tendendo a diminuir com o tempo, à medida que o produto se aproxima do seu teor de água de equilíbrio (Bello et al., 2004; Turhan et al., 2002; Resio et al., 2006). Bello et al. (2004) argumentam que este fato pode ser atribuído à rápida absorção de água pelos capilares das camadas externas do pericarpo, promovendo assim uma rápida elevação do teor de água no produto, tendendo a

diminuir com sua saturação. Outro fator a que poderia ser atribuído às altas taxas de absorção inicial de água seria o alto gradiente de teor de água existente entre os vários tecidos constituintes do grão e do meio.

Também pode ser observado que o efeito da temperatura na absorção de água foi mais evidente para o milho com menores índices de danificação mecânica [(2,847 e 14,077) $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$]. Nessas condições, é possível notar que há um aumento regular na quantidade de água absorvida para incrementos iguais de temperatura. Todavia não é possível distinguir as variações no teor de água em relação às temperaturas de (40, 50 e 60) °C dos grãos de milho com os maiores níveis de danificação mecânica [(22,261, 29,194 e 32,971) $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$], principalmente depois de decorridos os primeiros trezentos minutos (5 h) de teste. Para estas temperaturas, devido ao nível de danificação mecânica, os grãos tendem a atingir o mesmo teor de água de equilíbrio. Na literatura especializada, a temperatura é tida como o principal fator que afeta a quantidade de água absorvida durante a embebição, no entanto, como observado neste trabalho, outros fatores, como a integridade física do produto, podem afetar de forma expressiva a absorção de água.

Ainda de acordo com a Figura 1.4, observou-se que apenas para a temperatura de 70 °C foi possível distinguir os valores da variação do teor de água nos grãos de milho independentemente do nível de danificação. Notadamente para esta condição houve maior absorção de água independentemente da temperatura de absorção ou da integridade física do produto. Maskan (2002) observou comportamento similar a este estudando o processo de embebição no trigo e em seus subprodutos e atribuiu a esse comportamento o fato de que o trigo a esta temperatura já teria atingido a temperatura de gelatinização do amido. Isto permite sugerir que a temperatura de gelatinização das amostras de milho utilizadas neste trabalho se situa entre (60 e 70) °C. Este resultado estaria de acordo com Souza e Andrade (2000), que verificaram, por microscopia óptica, que a temperatura de gelatinização do amido de milho é de 70 °C. O processo de gelatinização, que acontece principalmente em produtos amiláceos quando esses atingem a temperatura de gelatinização, causa uma ruptura na estrutura cristalina dos grânulos de amido, começando esses grânulos a intumescer e a formar soluções consideravelmente viscosas promovendo um excesso de água no grão. Além disso, devido à gelatinização do amido, danificações físicas que o produto venha a ter como trincas, podem ser reconstituídas, minimizando assim o efeito da integridade física no processo de absorção de água.

1.3.3 Desempenho do modelo de Peleg na descrição do fenômeno de absorção de água

Na Figura 1.5 estão apresentados os valores observados e os estimados pelo modelo de Peleg linearizado (Equação 1.2), das variações dos teores de água nos grãos de milho ao longo do processo de embebição, para as temperaturas e diferentes níveis de danificação mecânica utilizados.

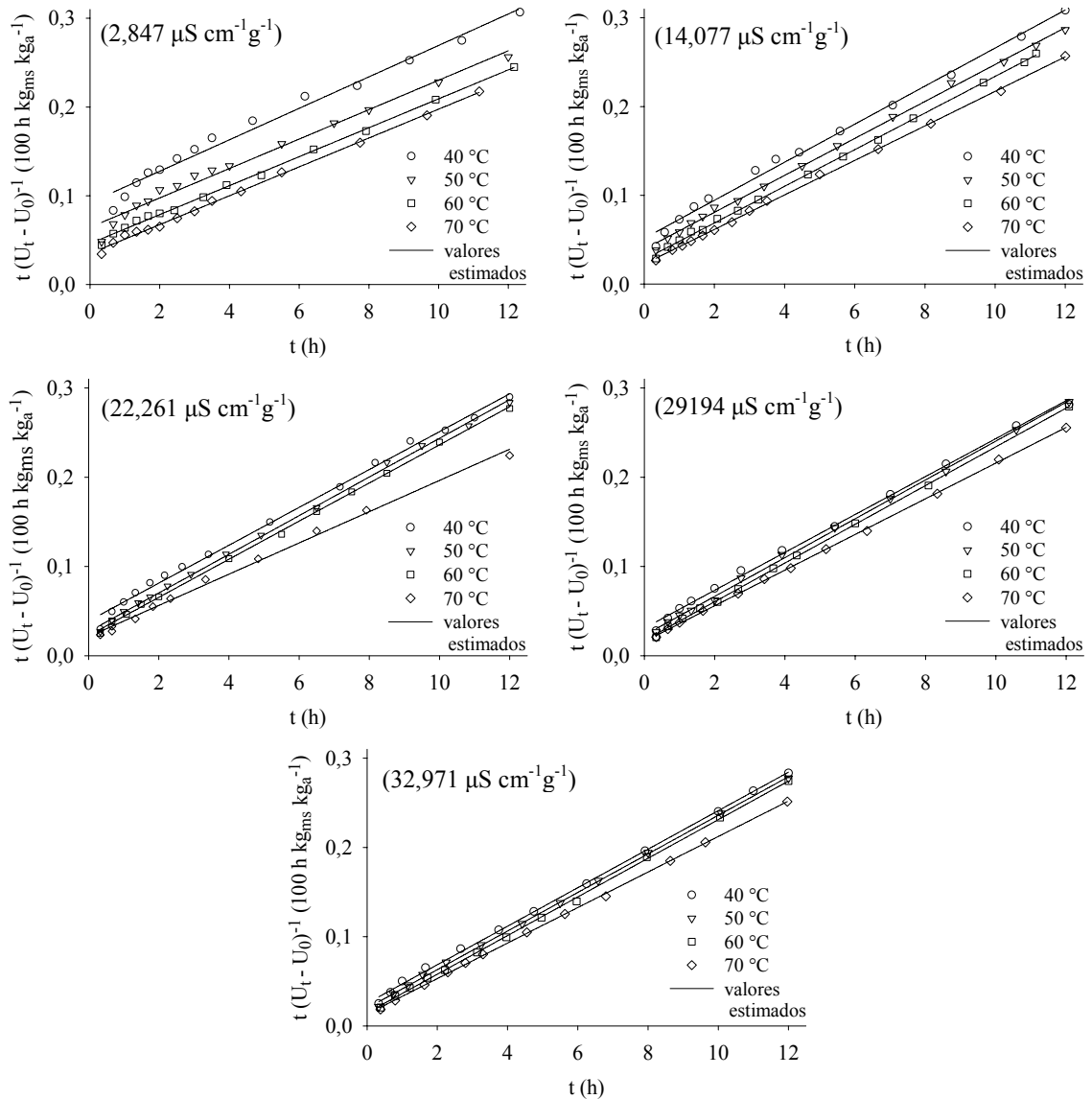


Figura 1.5: Valores observados e estimados pelo modelo de Peleg linearizado do teor de água ao longo do tempo para as diferentes temperaturas e níveis de danificação mecânica dos grãos de milho.

Verifica-se pela Figura 1.5 que o modelo de Peleg se ajustou bem aos dados observados para todas as combinações de temperatura com níveis de danificação mecânica

dos grãos de milho, o que pode ser verificado pelas magnitudes dos parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Valores do desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P), coeficiente de determinação (R^2) e coeficientes (C_1 e C_2) do modelo de Peleg obtidos pelo ajuste aos dados experimentais da embebição dos grãos de milho com diferentes níveis de danificação mecânica em diferentes temperaturas.

CE ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	C_1 ($100 \text{ h kg}_{\text{ms}} \text{kg}_a^{-1}$)	C_2 ($100 \text{ kg}_{\text{ms}} \text{kg}_a^{-1}$)	SE (% b.s.)	P (%)	R^2 (%)
2,847	40	0,098007**	0,016764**	1,529	2,59	99,30
	50	0,065200**	0,016309**	1,267	2,04	99,60
	60	0,046385**	0,016237**	0,870	1,25	99,84
	70	0,036132**	0,016095**	1,111	1,59	99,73
14,077	40	0,055591**	0,021021**	1,308	2,00	99,44
	50	0,039202**	0,020813**	0,958	1,44	99,70
	60	0,028878**	0,020469**	1,0270	1,21	99,77
	70	0,022620**	0,019388**	0,881	1,00	99,50
22,261	40	0,038892**	0,021215**	1,792	2,38	99,45
	50	0,028467**	0,021476**	1,246	1,65	99,91
	60	0,023805**	0,021219**	1,120	1,29	99,95
	70	0,016301**	0,019685**	2,509	3,06	99,57
29,194	40	0,029803**	0,021645**	1,627	2,10	99,63
	50	0,022937**	0,021752**	1,389	1,77	99,38
	60	0,017120**	0,021696**	1,207	1,53	99,50
	70	0,016016**	0,019981**	0,846	0,97	99,81
32,971	40	0,025485**	0,021569**	1,582	2,03	99,23
	50	0,019928**	0,021607**	1,506	1,60	99,81
	60	0,014727**	0,021640**	1,242	1,46	99,48
	70	0,013297**	0,019896**	1,064	1,13	99,67

** p -valor $< 0,0001$ (probabilidade da hipótese nula ser verdadeira)

De acordo com os dados da Tabela 1.1, observa-se que o ajuste do modelo de Peleg apresentou valores do coeficiente de determinação acima de 99 % e que o p -valor para

todos os coeficientes (probabilidade da hipótese de nulidade ser verdadeira) foi menor que 0,0001 para todas as condições, o que segundo Resio et al. (2006), indica um bom ajuste desse modelo aos dados experimentais. Valores do coeficiente de determinação acima de 99 % são tidos como satisfatórios para o modelo de Peleg (Cunningham et al., 2007), no entanto, o emprego isolado deste coeficiente não deve ser usado como critério de avaliação de modelos não lineares (Kashaninejad et al. 2007; Cunningham et al., 2007). Considerando a faixa de variação do teor de água dos grãos de milho, o modelo apresentou valores satisfatórios do desvio padrão da estimativa e uma variabilidade dos dados estimados menor que 10 % para todas as condições de embebição, o que é recomendado para o uso de modelos não lineares (Madamba et al., 1996; Cunningham et al., 2007).

O comportamento da taxa constante de Peleg (C_1) em relação à temperatura e ao nível de danificação mecânica está apresentado na Figura 1.6.

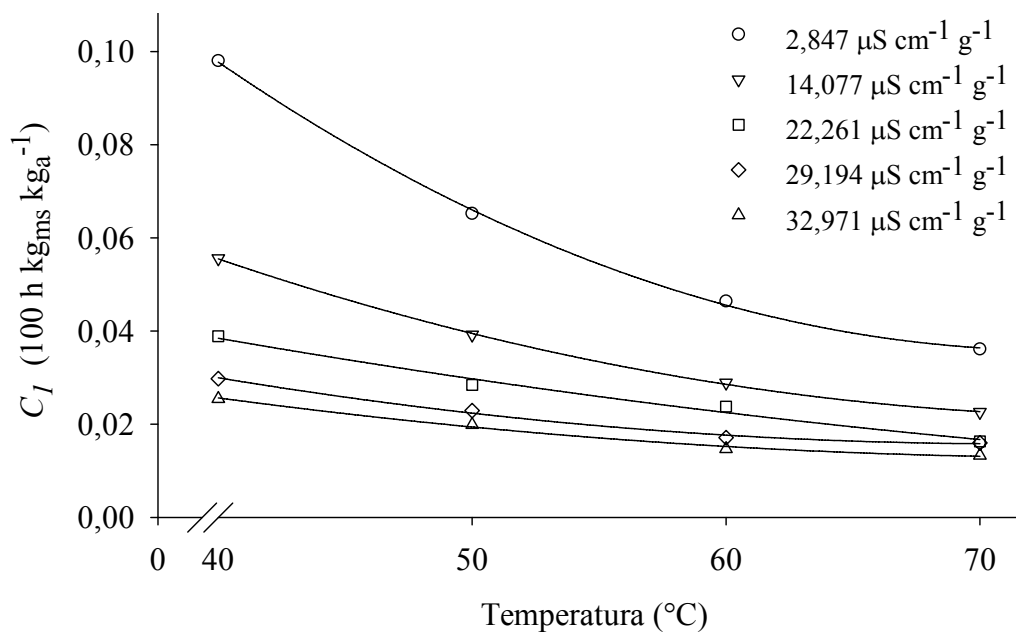


Figura 1.6: Variação da Taxa constante de Peleg (C_1) em relação à temperatura para os cinco níveis de danificação mecânica dos grãos de milho analisados.

A taxa constante de Peleg decresceu com o aumento da temperatura e essa diminuição foi mais expressiva para o produto com menores índices de danificação mecânica (Figura 1.6). Notou-se ainda que a constante C_1 tendeu a se estabilizar para temperaturas mais elevadas e, além disso, quanto maior o nível de danificação mecânica, menor foi o seu valor para uma mesma temperatura.

Este comportamento apresentado pela constante C_1 em relação à temperatura é comumente observado em trabalhos de modelagem de absorção de água (Resende e Corrêa, 2007; Cunningham et al., 2007).

A constante C_1 do modelo de Peleg está relacionada com a taxa de transferência de massa, sendo que quanto menores forem os seus valores, maiores serão as taxas iniciais de absorção de água (Turhan et al., 2002). Este coeficiente pode ser ainda relacionado com o coeficiente de difusão (Cunningham et al., 2007; Maskan, 2002). Pelos valores observados dessa constante é possível verificar que a integridade física do produto interfere de forma expressiva na taxa de absorção inicial de água durante o processo de embebição. Possivelmente, produtos danificados estruturalmente apresentem trincas que formam canais preferenciais para a água que são logo ocupados no início do processo de embebição. Assim, para processos de hidratação em temperaturas de subgelatinização, caso do processamento do milho por via úmida, o efeito da danificação mecânica na absorção inicial de água nos produtos agrícolas pode ser tão importante quanto o efeito da variação da temperatura.

O comportamento da capacidade constante de Peleg (C_2) em relação à temperatura e ao nível de danificação mecânica está apresentado na Figura 1.7.

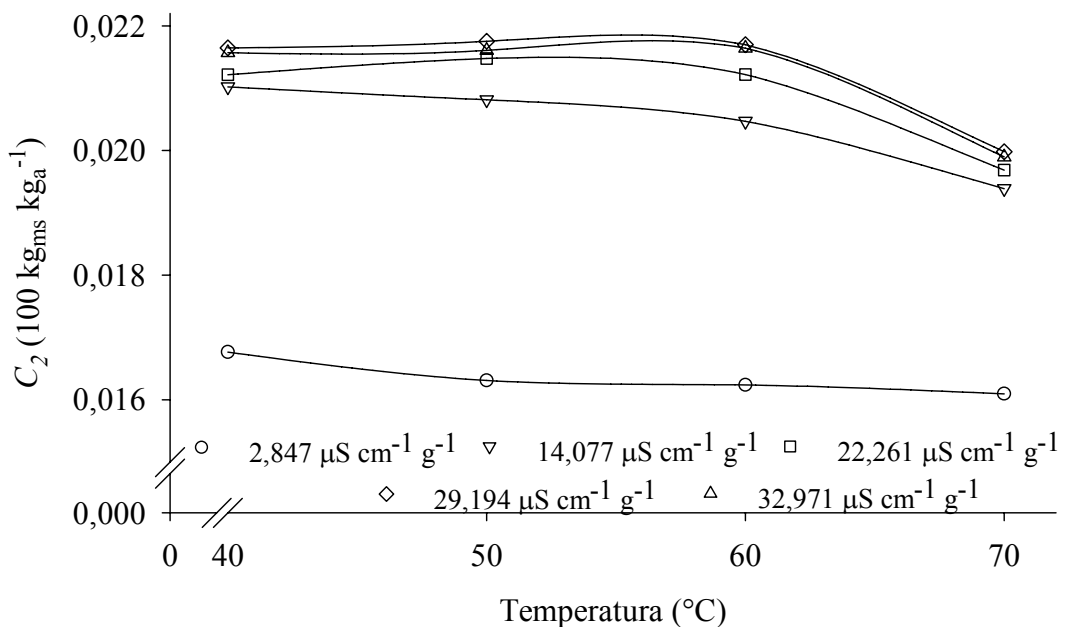


Figura 1.7: Variação da capacidade constante de Peleg (C_2) em relação à temperatura para os cinco níveis de danificação mecânica dos grãos de milho analisados.

De acordo com a Figura 1.7, verifica-se que, de um modo geral, a capacidade constante de Peleg decresceu com o aumento da temperatura, independentemente do nível de danificação do produto, concordando assim com a maioria dos trabalhos dessa linha de estudos (Resende e Corrêa, 2007; Cunningham et al., 2007). A constante C_2 apresentou maiores valores para produtos com maiores níveis de danificação, sendo as magnitudes dessas constantes menores para os produtos sem danificação induzida (testemunha). Além disso, verifica-se que para os produtos sem danificação a constante C_2 apresentou uma diminuição gradual em relação à temperatura, enquanto os danificados apresentaram uma queda acentuada do valor dessa constante para a temperatura de 70 °C.

A capacidade constante de Peleg, C_2 , está relacionada com a capacidade máxima de absorção de água, e quanto menor o seu valor, maior será a absorção de água pelo produto (Maskan, 2002). Diante disso é possível afirmar que a danificação física do produto tem influência direta não apenas sobre a taxa de absorção inicial de água, mas também na quantidade de água total que o produto é capaz de absorver. Outra observação importante é que mesmo que o produto atinja a temperatura de gelatinização do amido (entre 60 °C e 70 °C) e assim essas fissuras sejam reconstituídas, o produto não atinge um teor de água de equilíbrio de um produto sem danificação mecânica.

Na Tabela 1.2 são apresentados os valores das umidades de equilíbrio estimadas pelo modelo de Peleg para cada condição de embebição.

Tabela 1.2 - Valores estimados dos teores de água de equilíbrio (% b.s.) para cada nível de danificação e temperatura analisados.

Nível de danificação mecânica ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$)	Temperatura (°C)			
	40	50	60	70
2,847	74,0aA	76,19abA	77,45bA	78,15bA
14,077	62,63aB	63,56aB	65,09aB	67,33bB
22,261	62,68aB	62,42aB	62,99aB	69,85bB
29,194	62,93aB	62,70aB	62,59aB	66,77bB
32,971	63,09aB	63,01aB	62,94aB	66,99bB

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

Nota-se, pela Tabela 1.2, que para todas as condições em que os grãos de milho possuíam algum nível de danificação mecânica, o teor de água de equilíbrio alcançado foi significativamente o mesmo, à exceção da temperatura de 70 °C. Já para os grãos de milho sem danificação mecânica induzida (testemunha), não se notou diferença significativa entre os teores de água de equilíbrio alcançados para as temperaturas de (50, 60 e 70) °C. Verifica-se ainda que para uma mesma temperatura de embebição, os teores de água de equilíbrio alcançados pelos grãos de milho sem danificação mecânica foram superiores aos alcançados pelo produto danificado. Assim, apesar de a capacidade de absorção de água inicial ser maior, quanto maior for o nível de danificação mecânica (conforme discutido anteriormente), os teores de água de equilíbrio alcançados no processo de embebição pelos grãos de milho danificados, são sempre menores quando comparados aos sem danificação.

1.3.4 Coeficiente de difusão efetivo

O coeficiente de difusão efetivo para cada temperatura da solução de embebição e para cada nível de danificação física dos grãos de milho estão apresentados na Tabela 1.3.

Tabela 1.3 - Coeficientes de difusão efetivos para grãos de milho com diferentes níveis de danificação mecânica, submetidos à embebição nas temperaturas de (40, 50, 60 e 70) °C.

Temperatura (°C)	Nível de danificação mecânica ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$)				
	2,847	14,077	22,261	29,194	32,971
	Coeficiente de difusão efetivo $\times 10^{10}$ ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)				
40	2,403	5,366	7,242	9,449	10,672
50	3,454	7,061	10,184	12,407	14,012
60	4,751	9,651	11,920	17,107	19,220
70	6,219	11,621	13,158	16,444	19,115

Observa-se pela Tabela 1.3 que, de um modo geral, o coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}) aumentou com o aumento da temperatura de embebição. A dependência do D_{ef} com a temperatura é frequentemente relatada em trabalhos que envolvem transporte de água em produtos agrícolas, seja por fenômenos de adsorção ou dessorção. Addo et al. (2006), estudando a embebição em duas variedades de milho, Obatanpa e Mamaba, encontraram valores do D_{ef} variando de ($7,3 \times 10^{-12}$ a $9,3 \times 10^{-12}$) $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ e ($6,3 \times 10^{-12}$ a $8,25 \times 10^{-12}$) $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, respectivamente para essas variedades, para uma faixa de temperatura de

(30 a 60) °C. Gely e Giner (2007) estudando o processo de secagem em uma variedade de soja, observaram valores do D_{ef} entre $(1,78 \times 10^{-11}$ e $28 \times 10^{-11}) \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para temperaturas variando entre (19 e 75) °C. A dependência desse coeficiente com a temperatura pode ser explicada pelo fato de que, com o aumento da temperatura, a viscosidade da água diminui e, sendo a viscosidade uma medida da resistência do fluido ao escoamento, variações dessa propriedade implicam alterações na difusão da água nos capilares do grão de modo a favorecer a movimentação desse fluido no produto. Outro fator a que pode ser atribuída essa variação do coeficiente de difusão efetivo é que com o aumento da temperatura aumenta o nível de vibração molecular das moléculas da água, o que também contribui para uma difusão mais eficaz.

No entanto, pode-se notar que as maiores variações dos D_{ef} se deram quando se consideram os valores obtidos nas condições em que o produto apresenta alguma danificação física. Esses valores estão de acordo com os encontrados para a constante C_1 do modelo de Peleg, discutidos anteriormente, em que os produtos com maiores níveis de danificação apresentaram as maiores taxas de absorção iniciais de água.

Com base nos coeficientes referentes à taxa e difusão de água analisados neste trabalho pode-se concluir que assim como a temperatura, a integridade física do produto interfere de forma expressiva no processo de absorção de água durante a embebição.

A dependência do coeficiente de difusão efetivo dos grãos de milho com diferentes níveis de danificação celular com a temperatura esta representada na Figura 1.8, correspondente à linearização da Equação de Arrhenius.

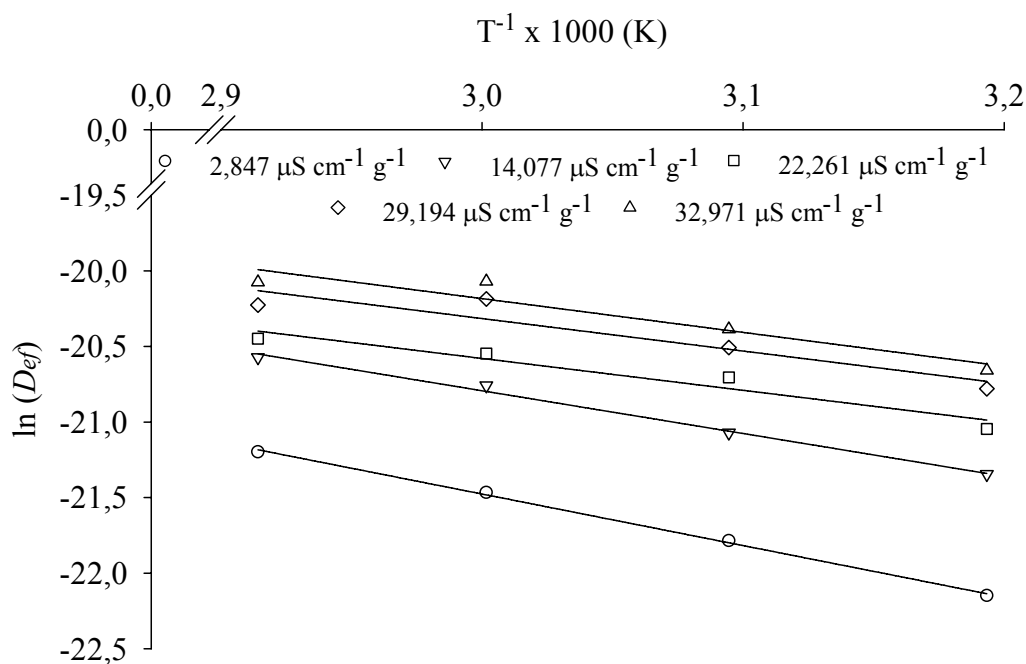


Figura 1.8: Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}) dos grãos de milho com diferentes níveis de danificação.

Observa-se na Figura 1.8 que no intervalo de temperatura experimentado (40 °C a 70 °C), houve uma uniformidade na variação do D_{ef} com a temperatura para todas as condições de danificação física dos grãos de milho estudados e uma boa relação entre os dados observados e os estimados pelo Modelo de Arrhenius (Equação 1.8).

A Tabela 1.4 apresenta as energias de ativação e os valores dos fatores pré-exponenciais obtidos a partir da equação de Arrhenius ajustada aos coeficientes de difusão efetivos da água nos grãos de milho para os diferentes níveis de danificação mecânica avaliados e para a faixa de temperatura entre (40 e 70) °C.

Tabela 1.4 - Valores observados da energia de ativação e dos fatores pré-exponenciais da difusão da água nos grãos de milho com níveis de danificação mecânica para a faixa de temperatura estudada.

Danificação mecânica ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$)	Energia de Ativação (kJ mol^{-1})	Fator pré-exponencial ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
2,847	28,366	2,420
14,077	23,536	2,510
22,261	14,533	2,650
29,194	17,874	2,631
32,971	18,584	2,601

Os valores da energia de ativação para o processo de difusão de água nos grãos de milho diminuíram com o aumento do nível de danificação, tendendo a se estabilizar a partir de níveis de danificação referentes a 22,261 $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$. Já o fator pré-exponencial, que representa a difusividade quando a temperatura tende ao infinito (Guiné et al., 2006), aumentou com o aumento do nível de danificação, tendendo a se estabilizar. Segundo Engels et al. (1986), a energia de ativação para produtos agrícolas submetidos ao processo de embebição varia entre (22 e 65) kJ mol^{-1} . Os valores encontrados para os grãos de milho íntegros (testemunha) e com menores níveis de danificação mecânica (14,077 $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$) corroboram com os resultados desses autores, sendo inferiores para os produtos mais danificados.

A energia de ativação por definição é a energia mínima exigida para que um determinado processo seja desencadeado, sendo que, neste caso, quanto menor o seu valor mais facilmente será desencadeado o processo difusivo nos grãos de milho. Assim, de acordo com os resultados obtidos quanto maior a danificação do produto, menor será a energia requerida e conseqüentemente maior a difusão de água no mesmo.

A Tabela 1.5 apresenta alguns valores para fins de comparação da energia de ativação para diferentes produtos agrícolas e industrializados submetidos ao processo de embebição em diferentes faixas de temperatura.

Tabela 1.5 - Valores de referência para energia de ativação (E_a) na difusão de água em diferentes produtos.

Produto	Faixa de temperatura (°C)	E_a (kJ mol ⁻¹)	Referência
Milho (Mamaba)	30 – 60	6,82	Addo et al. (2006)
Milho (Obatanpa)	30 – 60	6,54	Addo et al. (2006)
Milho (Zêneca 8392)	45 – 65	33,8	Lopes Filho et al. (2006)
Feijão (vermelho)	20 – 40	6,748	Resende e Corrêa (2007)
Cogumelo	25 – 70	19,2	Garcia-Pascual et al. (2005)
Amaranto	30 – 60	32,1	Resio et al. (2003)
Macarrão penne	20 – 80	7,88	Cunningham et al. (2007)
Arroz polido	30 – 60	31,50	Thakur e Gupta (2006)
Arroz integral	30 – 60	37,32	Thakur e Gupta (2006)
Arroz em casca	30 – 60	19,25	Thakur e Gupta (2006)

As descrições entre parênteses referem - se às variedades.

1.4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e nas condições em que foram realizados os experimentos, conclui-se que:

- As alterações estruturais causadas pela danificação mecânica induzida nos grãos de milho alteraram as taxas de absorção de água no produto, e quanto maiores os níveis de danificação, maiores foram as taxas de absorção de água;
- O modelo de Peleg se ajustou adequadamente aos dados experimentais, apresentando altos valores do coeficiente de determinação ($R^2 > 99,97\%$), baixas magnitudes do erro médio relativo e do desvio padrão da estimativa e significância dos coeficientes ($p\text{-valor} < 0,0001$), independentemente do nível de danificação;

- Os valores dos teores de água de equilíbrio estimados pelo modelo de Peleg praticamente não variaram com o aumento da temperatura, principalmente para grãos de milho danificados mecanicamente;
- Os valores dos coeficientes de difusão efetivos aumentaram com os aumentos da temperatura e do nível de danificação; e
- A dependência do coeficiente de difusão efetivo com a temperatura pode ser descrita pelo Modelo de Arrhenius. Quanto mais íntegro fisicamente o produto, maior o valor da energia de ativação obtido. As energias de ativação obtidas neste trabalho variaram entre (14,533 e 28,366) kJ mol⁻¹.

1.5 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.

ADDO, A.; BART-PLANGE, A.; DZISI, K. Water Absorption characteristics of Obatanpa and Mamaba Maize Hybrids (*Zea mays*). **International Journal of Food Engineering**, v. 2, Iss. 3, Art. 7, 2006.

BELLO, M.; TOLABA, M. P.; SUAREZ, C. Water absorption and starch gelatinization in whole rice grain during soaking. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v. 40, p. 313 - 318, 2007.

BELLO, M.; TOLABA, M. P.; SUAREZ, C. Factors affecting water uptake of rice grain during soaking. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v. 37, p. 811 - 816, 2004.

BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Regras para análises de sementes**. Brasília, 1992, 365 p.

CUNNINGHAM, S. E.; MCMINN, W. A. M.; Richardson, P. S. Modelling water absorption of pasta during soaking. **Journal of Food Engineering**, v. 82, p. 600 - 607, 2007.

DOWD, M. K. Improvements to laboratory-scale maize wet-milling procedures. **Industrial Crops and Products**, v. 18, p. 67 - 76, 2003.

- ENGELS, C.; HENDRICKX, M.; DE SAMBLANX, S.; TOBBACK, P. Modeling water diffusion during long grain rice soaking. **Journal of Food Engineering**, v. 5 (1), p. 55 - 73, 1986.
- FESSEL, S. A.; VIEIRA, R. D.; CRUZ, M.C. P.; PAULA, R. C.; PANOBIANCO M.; Electrical conductivity testing of corn seeds as influenced by temperature and period of storage. **Revista Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, v.41 (10), p.1551 - 1559, 2006.
- GARCIA-PASCUAL, P., SANJUAN, N., BON, J., CARRERES, J., MULET, A. Rehydration process of *Boletus edulis* mushroom: Characteristics and modelling. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 85, p. 1397 - 1404, 2005.
- GELY, M. C; GINER, S. A. Diffusion Coefficient Relationships during Drying of Soya Bean Cultivars. **Biosystems Engineering**, v. 96 (2), p. 213 - 222, 2007.
- GUINÉ, R. P. F.; FERNANDES, R. M. C. Analysis of the drying kinetics of chestnuts. **Journal of Food Engineering**, v. 76, p. 460 - 467, 2006.
- HAROS, M.; BLASZCZAK, W.; PEREZ, O. E.; SADOSKA, J.; ROSELL, C. M. Effect of ground corn steeping on starch properties. **European Food Research Technology**, v. 222, p. 194 - 200, 2006.
- HAROS, M.; TOLOBA, M. P.; SUAREZ, C. Influence of corn drying on its quality for the wet-milling process. **Journal of Food Engineering**, v. 60, p. 177 - 184, 2003.
- HAROS, M.; SUAREZ, C. Effect of drying, initial moisture and variety in corn wet milling. **Journal of Food Engineering**, v. 84, p. 473 - 481, 1997.
- JAIN, R. K.; BAL, S. Properties of pearl millet **Journal Agricultural Engineering Research**, v. 66, p. 85 - 91, 1997.
- KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L. G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 98 - 108, 2007.
- LOPES FILHO, J. F.; RAMOS, A. P.; ROMERO, J. T. Difusividade da água, dióxido de enxofre e ácido lático em grãos de milho durante a maceração para o processo de moagem úmida. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 9 (4), p. 257 - 263, 2006.
- MADAMBA, P. S.; DRISCOLLB, R. H.; BUCKLEB, K. A. The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, p. 75 - 97, 1996.
- MASKAN, M.; Effect of processing on hydration kinetics of three wheat products of the same variety. **Journal of Food Engineering**, v. 52 p. 337 - 341, 2002.
- PELEG, M. An empirical model for the description of moisture sorption curves. **Journal of Food Science**, v. 52, p. 1216 - 1217 e 1219, 1988.
- PEREZ, O. E.; HAROS, M.; SUAREZ, C.; ROSELL, C. M. Effect of steeping on the starch properties from ground whole corn. **Journal of Food Engineering**, v. 60, p. 281 - 287, 2003.

- RAMIREZ, E. C.; JONHSTON, D. B.; MCALOON, A. J.; YEE, W.; SINGH, V.; Engineering process and cost model for a conventional corn wet milling facility. **Industrial Crops and Products**, v. 27, p. 91 - 97, 2008.
- RESENDE, O.; CORREA, P. C. Modelagem matemática do processo de hidratação de sementes de feijão. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 29, p. 373 - 378, 2007.
- RESIO, A. C.; AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C. Hydration kinetics of amaranth grain. **Journal of Food Engineering**, v. 72, p. 247 - 253, 2006.
- 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.
- ROCA, E.; GUILLARD, V.; BROYART, B.; GUILBERT, S.; GONTARD, N. Effective moisture diffusivity modeling food structure and hygroscopicity. **Food Chemistry**, v. 106, p. 1428 - 1437, 2008.
- THAKUR., A. K.; GUPTA, A. K. Water absorption characteristics of paddy, brown rice and husk during soaking. **Journal of Food Engineering**, v. 75, p. 252 - 257, 2006.
- 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.
- ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, v. 14 (10), p. 2225 - 2253, 1996.

CAPÍTULO 2

Modelagem da expansão volumétrica e variação das características físicas do milho durante a embebição

2.1 INTRODUÇÃO

A secagem é o método mais utilizado para preservar a qualidade de grãos durante o armazenamento. Esta operação se baseia na redução dos valores da atividade de água pela redução da quantidade de água do produto, diminuindo assim a atividade respiratória dos grãos e limitando o desenvolvimento de microrganismos e insetos na massa granular.

No entanto, alguns dos produtos previamente secos para serem processados precisam ser novamente hidratados por imersão em água ou em vapor d'água sob temperatura e pressão controladas, dependendo dos diferentes tipos de processamento industrial a que forem submetidos.

A reidratação é um processo complexo que visa à restauração de propriedades do material previamente seco (Bilbao-Sáinz et al., 2005). Os processos de secagem seguidos de reidratação induzem muitas mudanças na estrutura e composição de tecidos vegetais prejudicando a reconstituição de suas propriedades (Lewicki et al., 1997). Assim, a reidratação pode ser considerada uma forma de avaliar injúrias causadas aos alimentos

durante as etapas de seu processamento, principalmente durante a secagem (Lewicki, 1998).

Além de promover alterações químicas e bioquímicas nos produtos agrícolas, a variação do seu teor de água, seja pela secagem ou por algum processo de reidratação, normalmente influencia de forma direta seu volume e suas principais propriedades físicas.

O conhecimento das propriedades físicas dos produtos de origem vegetal é de fundamental importância para o correto dimensionamento de equipamentos necessários às diversas etapas do seu processamento, além da simulação dos diversos processos e fenômenos aos quais o material é submetido.

As alterações nas propriedades físicas de diversos produtos agrícolas em função do teor de água foram estudadas por diversos pesquisadores principalmente durante o processo de secagem como: milho-pipoca (Karababa, 2006), sementes de algodão (Manimehalai e Viswanathan, 2006), ervilha (Yalçın et al. 2007), feijão (Resende et al, 2008) e mamona (Goneli, 2008).

Mudanças volumétricas em grãos devido à retirada de água são relatadas como as principais causas das alterações das propriedades físicas de produtos agrícolas (Lozano et al., 1983; Sokhansanj e Lang, 1996). Todavia, poucas informações sobre mudanças que ocorrem nas dimensões características dos grãos durante os processos de reidratação e sua relação com as variações nas propriedades físicas têm sido reportadas (Muramatsu et al., 2006; Yadav e Jindal, 2007).

A expansão volumétrica total dos produtos agrícolas, quando submetidos ao processo de hidratação, geralmente tem uma correlação direta com a temperatura de embebição e pode ocorrer em proporções diferenciadas quando se consideram as dimensões características desses produtos (Bayram et al., 2004a; Bayram et al., 2004b). Maskan (2001) verificou que as mudanças volumétricas do trigo durante a reidratação correspondem à quantidade de água absorvida e que o volume dos grãos aumentaram significativamente devido à absorção de água e ao aumento da temperatura de embebição.

Para projetos que envolvam o desenvolvimento e ou aperfeiçoamento de equipamentos utilizados no processo de hidratação de grãos, é de fundamental importância a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a adsorção e absorção de água.

Muitos pesquisadores têm utilizado modelos empíricos para representar o fenômeno da variação volumétrica em produtos de natureza biológica (Lang e Sokhansanj, 1993;

Krokida e Maroulis, 1997). Os modelos empíricos normalmente não possuem uma fundamentação teórica e geralmente são obtidos a partir de analogias matemáticas simples com base no comportamento dos dados experimentais, na análise dimensional e na análise estatística. Estes modelos normalmente apresentam um bom ajuste aos dados observados, sendo seu uso limitado devido à sua dependência com as condições experimentais em que os dados foram obtidos e pelas características do material utilizado. Estes modelos requerem muitos testes experimentais e não devem ser extrapolados (Mayor e Serreno, 2004). Apesar disso, esses modelos foram propostos por alguns pesquisadores para modelagem de muitos processos nas diversas áreas da engenharia (Peleg, 1988; Bala e Woods, 1984; Midilli, 2002).

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho estudar e modelar a expansão volumétrica do milho para diferentes temperaturas da água de embebição, além de avaliar e modelar o comportamento de algumas características físicas do milho para diferentes teores de água e temperaturas de embebição.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado 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).

2.2.1 Matéria-prima

O milho (*Zea mays* L.), cultivar AG 1510, foi adquirido de um produtor rural da região de Viçosa (MG). Os grãos foram colhidos e debulhados manualmente e passaram por um processo de limpeza com uso de peneiras tendo sido retiradas as impurezas, grãos defeituosos e materiais estranhos.

O produto possuía inicialmente um teor de água de aproximadamente 0,250 (decimal b.s.), e os grãos foram secos em estufa com circulação forçada de ar a 45 °C até um teor de água de 0,142 (decimal b.s.). O teor de água foi determinado em estufa com circulação forçada de ar a 105 ± 1 °C por 24 h em três amostras de 40 g.

2.2.2 Embebição do milho

Para o processo de hidratação (maceração ou embebição), foram utilizadas amostras de 40 g de milho em três repetições. As amostras foram colocadas em frascos herméticos de 150 mL contendo uma solução de 0,2 % de dióxido de enxofre (SO₂) e 0,55 % de ácido láctico (C₃H₆O₃) em água destilada, proporcionando uma razão entre produto e solução de aproximadamente 1:3. A solução e a proporção utilizadas para o processo de hidratação referem-se à etapa de maceração convencional a que o milho é submetido no processamento via úmida, sendo essa relação de pelo menos 1:2. A solução foi obtida adicionando 5,9 g de metabissulfito de sódio (Na₂S₂O₅) e 11 mL de ácido láctico (C₃H₆O₃) em 2 L de água destilada (Lopes Filho et al., 2006).

As amostras utilizadas nos testes de danificação mecânica foram submetidas à hidratação em temperaturas controladas de (40, 50, 60 e 70) °C e suas massas medidas em balança digital com resolução de 0,01 g, em intervalos de tempo pré-determinados de 12 h ou até que o grão atingisse o teor de água de equilíbrio. Foi utilizado um conjunto de três amostras independentes para cada tempo de leitura.

Para a determinação das características físicas do produto em função do teor de água foram utilizados apenas os valores observados para a temperatura de hidratação de 40 °C.

2.2.3 Massa específica aparente e unitária

A massa específica unitária foi determinada pelo método de complementação de volume com óleo vegetal em bureta graduada, com resolução de 0,01 mL, utilizando-se cinquenta grãos de milho.

Para o cálculo da massa específica aparente foi utilizado um protótipo de uma balança de peso hectolitro de 0,1 L.

2.2.4 Porosidade

A porosidade foi determinada indiretamente a partir dos resultados da massa específica unitária e a massa específica aparente, de acordo a Equação 2.1, proposta por Mohsenin (1986):

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_u} \quad (2.1)$$

em que:

ε : porosidade do grão, adimensional;

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

ρ_u : massa específica unitária do grão, kg m^{-3} .

2.2.5 Forma e tamanho

A forma e o tamanho dos grãos de milho foram analisados pela circularidade, esfericidade e volume. Para isso foram feitas medidas das dimensões características de dez grãos de milho por meio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm.

A esfericidade do grão é uma grandeza adimensional que indica uma aproximação da forma esférica. Para calcular a esfericidade dos grãos de milho, utilizou-se a Equação 2.2, descrita por Mohsenin (1986).

$$\phi = \left[\frac{(abc)^{\frac{1}{3}}}{a} \right] \cdot 100 \quad (2.2)$$

em que:

ϕ : esfericidade, adimensional;

a : maior dimensão característica do grão, mm;

b : dimensão característica média do grão, mm; e

c : menor dimensão característica do grão, mm.

A circularidade dos grãos de milho foi verificada para as três posições de projeção: eixo maior, eixo menor e eixo médio, conforme esquema apresentado na Figura 2.1, por meio da Equação 2.3:

$$C = 100 \left(\frac{d_i}{d_c} \right) \quad (2.3)$$

em que:

C : circularidade, adimensional;

d_i : diâmetro do maior círculo inscrito, mm; e

d_c : diâmetro do maior círculo circunscrito, mm.

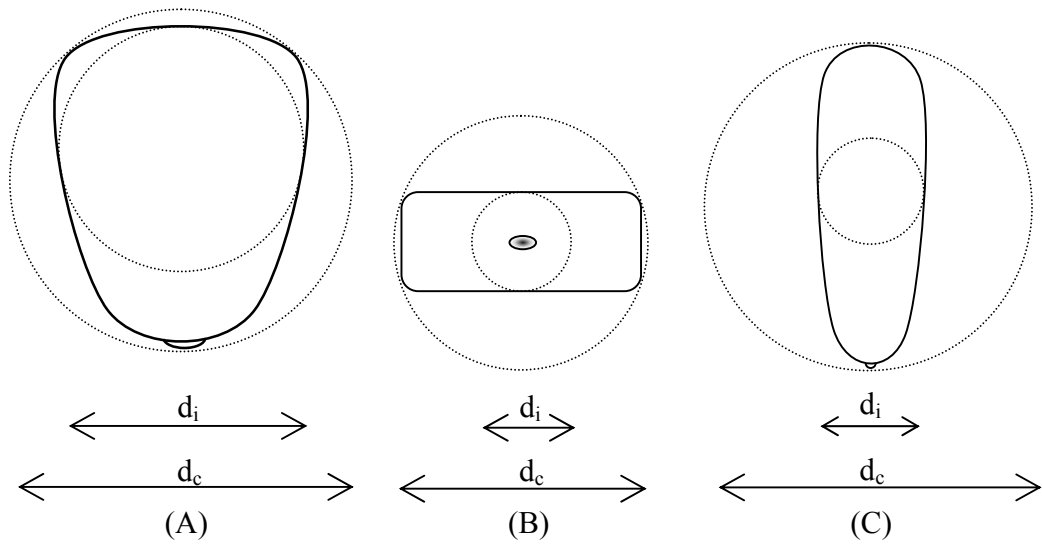


Figura 2.1: Representação esquemática dos grãos de milho nas três posições de projeção: maior eixo (A), menor eixo (B) e eixo médio (C).

Para o cálculo do volume, os grãos de milho foram considerados como sendo conoesféricos (similar a uma gota de um líquido), possuindo uma base esférica com superfície plana e um cone de base arredondada na porção de corte da esfera, de acordo com o esquema apresentado na Figura 2.2 (Jain e Bal, 1997).

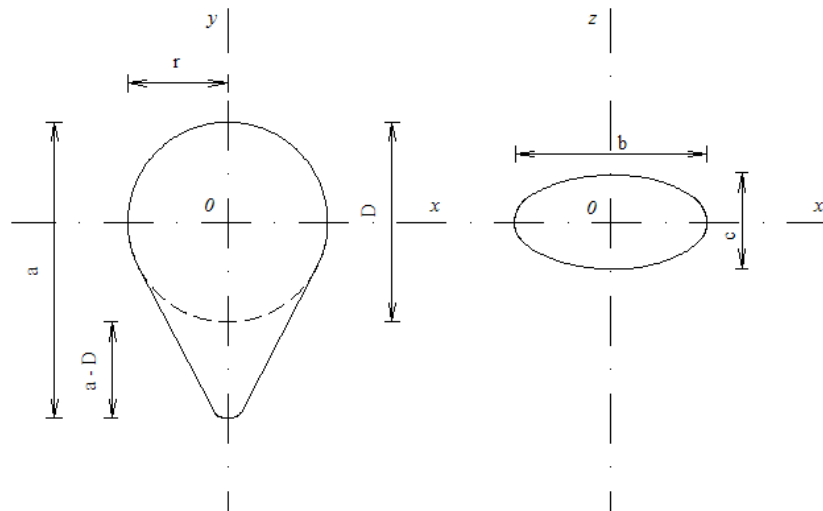


Figura 2.2: Forma conoesférica dos grãos de milho.

O volume dos grãos de milho foi estimado pela Equação 2.4:

$$V_g = \frac{\pi a^2 (bc)}{6 \left[2a - (bc)^{1/2} \right]} \quad (2.4)$$

em que:

- V_g : volume do grão, mm³;
- a : maior dimensão característica do grão, mm;
- b : dimensão média característica do grão, mm; e
- c : menor dimensão característica do grão.

2.2.6 Expansão volumétrica

A expansão volumétrica dos grãos de milho durante a hidratação foi determinada pela razão entre o volume dos grãos para cada teor de água e seu volume inicial, Equação 2.5.

$$\psi = \frac{V_g}{V_{g0}} = \frac{V_{ap}}{V_{ap0}} \quad (2.5)$$

em que:

- ψ : índice de expansão volumétrica dos grãos, adimensional;
- V_g : volume dos grãos num dado tempo, mm³;
- V_{g0} : volume inicial dos grãos, mm³;
- V_{ap} : volume aparente da massa de grãos num dado tempo, mm³; e
- V_{ap0} : volume aparente inicial da massa de grãos; mm³.

Para determinação do volume aparente da massa de grãos foi utilizada uma proveta acrílica de 250 mL graduada com resolução de 1 mL.

Na falta de modelos destinados à modelagem da expansão volumétrica de grãos, foram utilizados alguns modelos matemáticos frequentemente utilizados para a representação da contração volumétrica de produtos agrícolas, cujas expressões estão apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Modelos matemáticos para a contração volumétrica aparente e unitária de grãos.

Referência do modelo	Modelo	
Bala e Woods (1984)	$\psi = \delta \{1 - \exp[-\varphi(U_0 - U)]\}$	(2.6)
Corrêa et al. (2004)	$\psi = \left(\frac{1}{\delta + \varphi e^U} \right)$	(2.7)
Exponencial	$\psi = \delta e^{\varphi U}$	(2.8)
Linear	$\psi = \delta + \varphi U$	(2.9)
Polinomial	$\psi = 1 + \varphi U + \alpha U^2$	(2.10)
Rahman (1995)	$\psi = 1 + \beta(U - U_0)$	(2.11)
Proposto	$\psi = 1 + (U - U_0)^\varphi$	(2.12)

em que:

- ψ : índice de expansão volumétrica dos grãos, adimensional;
- U_0 : teor de água inicial do grão, decimal b.s.;
- U : teor de água do grãos em um dado tempo, decimal b.s.;
- β : coeficiente linear de expansão, $\text{kg}_{\text{ms}} \text{kg}_{\text{a}}^{-1}$; e
- φ , α e δ : parâmetros de ajuste dos modelos.

O ajuste dos modelos matemáticos foi realizado por análise de regressão não linear, pelos métodos Gauss-Newton e Simplex & Quasi-Newton, utilizando-se o programa Statistica 5.0[®].

2.2.7 Análise estatística dos modelos

Para verificar o grau de ajuste do modelo, foram consideradas as magnitudes do coeficiente de determinação (R^2), do erro médio relativo (P) e do desvio padrão da estimativa (SE), além do comportamento do ajuste dos modelos aos dados experimentais pela análise da distribuição dos resíduos. Os valores do erro médio relativo e do desvio padrão da estimativa para cada modelo foram calculados pelas equações 2.13 e 2.14, respectivamente:

$$P = \frac{100}{\eta} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (2.13)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (2.14)$$

em que:

Y : valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor estimado pelo modelo;

η : número de dados observados; e

GLR : graus de liberdade do resíduo (número de dados observados menos o número de parâmetros do modelo).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Massa específica aparente e unitária

As Figuras 2.3 e 2.4 apresentam os valores obtidos experimentalmente e os valores estimados da massa específica aparente e unitária dos grãos de milho, respectivamente, em função do teor de água.

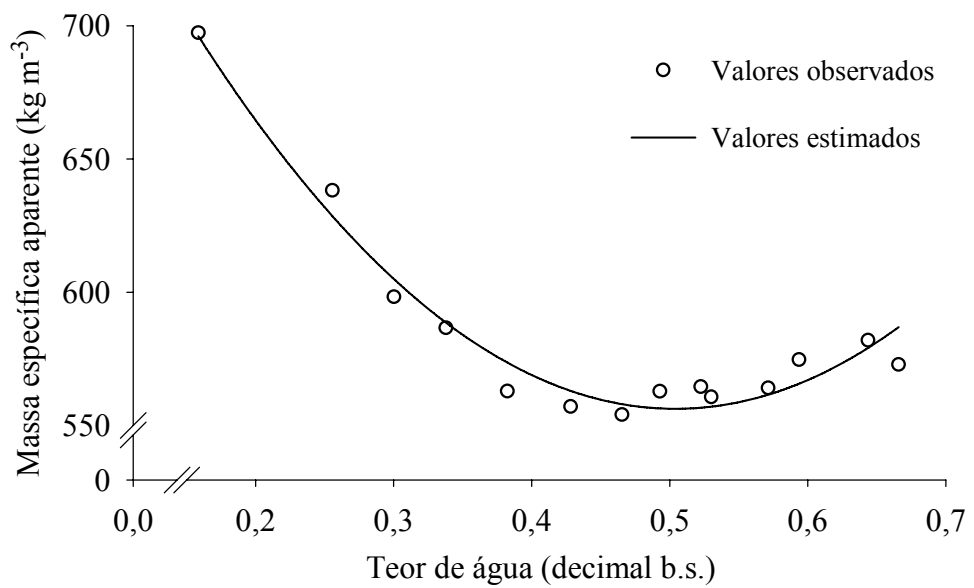


Figura 2.3: Valores observados e estimados para a massa específica aparente dos grãos de milho em função do teor de água.

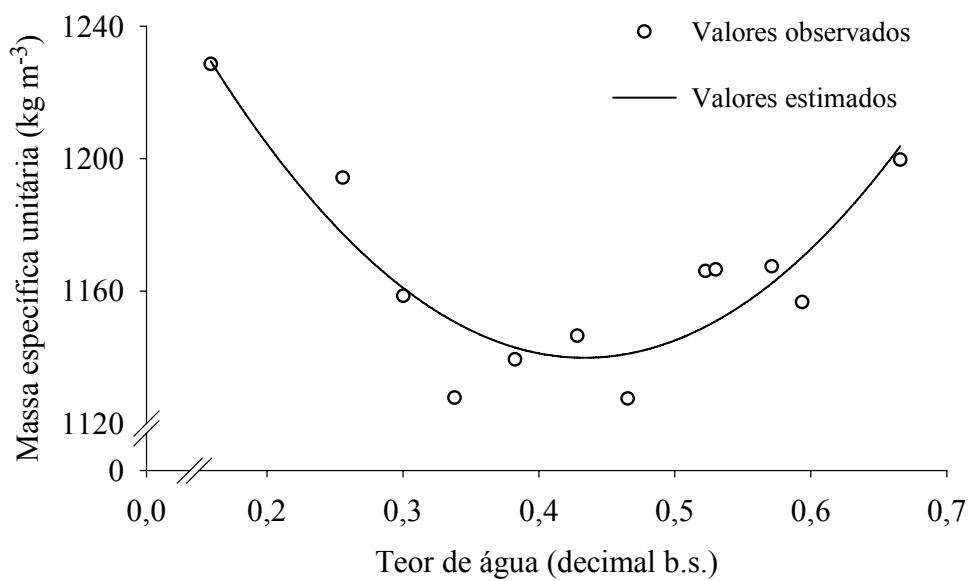


Figura 2.4: Valores observados e estimados para a massa específica unitária dos grãos de milho em função do teor de água.

Observa-se que tanto para a massa específica aparente como para a massa específica unitária a tendência apresentada pela curva dos valores estimados pode ser considerada

parabólica. Diante disso, supôs-se que a relação entre a massa específica aparente e a unitária possa ser dada pela Equação 2.15:

$$\hat{\rho} = \lambda_1 U^2 + \lambda_2 U + \lambda_3 \quad (2.15)$$

em que:

U : teor de água do grãos, decimal b.s.;

$\hat{\rho}$: valor estimado da massa específica; e

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$: parâmetros de ajuste do modelo.

O polinômio proposto foi ajustado aos dados experimentais da massa específica aparente e unitária em função do teor de água, e os valores dos coeficientes de determinação (R^2) e seus respectivos níveis de significância são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Coeficientes do modelo proposto ajustado aos valores experimentais da massa específica aparente (ρ_{ap}) e da unitária (ρ_u) em função do teor de água com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2).

	Parâmetros do modelo			R^2 (%)
	a	b	c	
Massa específica aparente (ρ_{ap})	1933,212**	-1682,405**	922,826	93,99
Massa específica unitária (ρ_u)	2020,998**	-1562,102**	1428,110	82,85

**Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste “t”

Observa-se na Tabela 2.2 que tanto a massa específica aparente quanto a massa específica unitária variaram significativamente numa relação quadrática com o teor de água, para a faixa estudada. Observa-se ainda, pelos valores do coeficiente de determinação (R^2) e pela significância dos coeficientes (significativos a 1% pelo teste “t”), que o polinômio proposto representou satisfatoriamente a variação das massas específicas aparente e unitária com o teor de água.

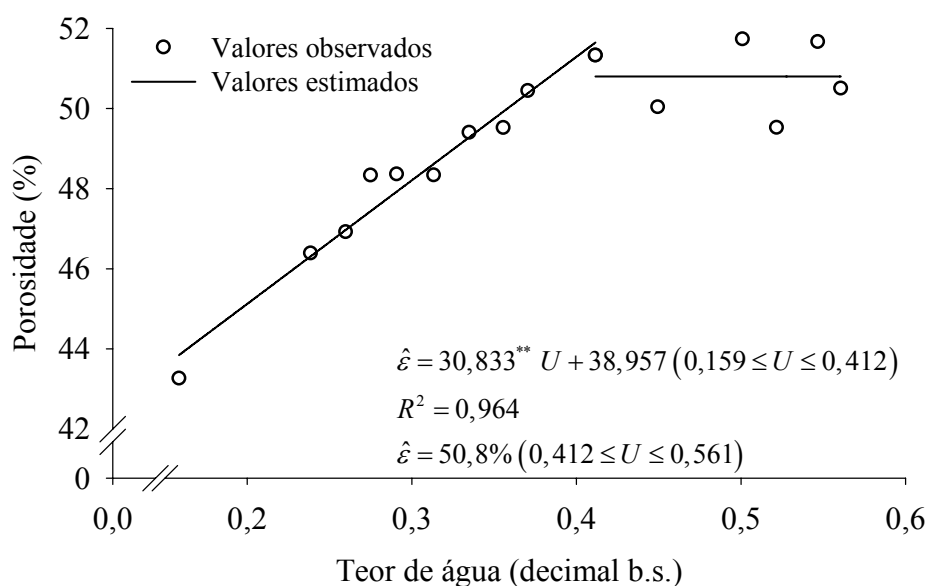
A massa específica aparente e a massa específica unitária apresentaram valores de (697,4 e 1228,5) kg m^{-3} , respectivamente, para um teor de água de 0,159 (decimal b.s.),

apresentando valores mínimos de (556,2 e 1139,9) kg m^{-3} para teores de água de (0,504 e 0,433) (decimal b.s.) devido ao seu comportamento (Figuras 2.3 e 2.4), alcançando valores de (575,8 e 1199,6) kg m^{-3} para um teor de água de 0,665 (decimal b.s.) no final do processo. Esse comportamento para a massa específica aparente também foi observado por Muramatsu et al. (2006), estudando o processo de hidratação em grãos de trigo e cevada e por Tagawa et al. (2002), que estudaram o processo de hidratação de diferentes variedades de feijão. Nestes trabalhos os autores identificaram um valor mínimo de massa específica para teores de água próximos a 0,30 (decimal b.s.) para trigo e cevada e 0,667 (decimal b.u.) para as diferentes variedades de feijão.

Esse comportamento deve-se ao fato de que com o aumento do teor de água dos grãos, pela absorção de água, o aumento de volume é proporcionalmente maior que o aumento de sua massa fazendo com que os valores da massa específica aparente e unitária diminuam. No entanto, devido a limitações físicas dos grãos, esta tendência se inverte a partir de teores de água de aproximadamente (0,504 e 0,403) (decimal b.s.), para a massa específica aparente e unitária dos grãos de milho, respectivamente.

2.3.2 Porosidade

Na Figura 2.5, estão apresentados os valores observados da porosidade obtidos pela relação dessa propriedade com a massa específica aparente e unitária, bem como os valores estimados.



** Significativo à 1% de probabilidade pelo teste “t”

Figura 2.5: Valores observados e estimados da porosidade do milho em função do teor de água.

É possível verificar, pela Figura 2.5, que os valores de porosidade variaram de (43,27 a 51,33) %, para uma variação do teor de água de (0,159 a 0,561) (decimal b.s.). Evidencia-se ainda que a porosidade apresentou um crescimento linear com o aumento do teor de água até valores próximos a 0,410 (decimal b.s.), a partir do qual houve uma tendência à estabilização para a faixa de teor de água estudada. Devido ao comportamento apresentado, propôs-se então um modelo bissegmentado, composto de um primeiro segmento linear, seguido por um constante. A equação linear proposta se ajustou bem aos dados experimentais, apresentando elevados valores para o coeficiente de determinação e significância do coeficiente angular da reta (significativos a 1% pelo teste “t”).

Os resultados encontrados nesse trabalho estão de acordo com diversos autores que relatam que a porosidade normalmente tem uma dependência direta com o teor de água dos grãos, como por exemplo: amaranto (Abalone et al., 2004); milho-pipoca (Karababa, 2006), milheto (Baryeh, 2002) e soja (Ribeiro et al., 2005). Todavia, nesses trabalhos a faixa de teor de água estudada foi relativamente baixa, compreendendo valores que normalmente correspondem aos teores de água na colheita e para armazenagem desses produtos, não sendo possível assim inferir sobre o comportamento da porosidade para teores de água mais elevados.

A porosidade, por definição, é a relação entre o volume de vazios e o volume da massa de produto particulado. Como o incremento de volume do produto é mais elevado no início do processo de hidratação, tendendo à estabilidade com o aumento do teor de água, o volume de espaços vazios do meio apresenta a mesma tendência e, conseqüentemente, a mesma porosidade.

2.3.3 Forma e tamanho

A variação dos eixos ortogonais dos grãos de milho e os valores de esfericidade e circularidade para os três eixos de projeção e para diferentes teores de água estão apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Valores observados de esfericidade (ϕ), circularidade (C) e índices de expansão específicos (a/a_0 , b/b_0 , c/c_0) para grãos de milho em diferentes teores de água.

Teor de água (decimal b.s.)	a/a_0 (%)	b/b_0 (%)	c/c_0 (%)	ϕ (%)	C_1 (%)	C_2 (%)	C_3 (%)
0,142	100,0	100,0	100,0	64,86	73,73	47,49	34,99
0,229	103,3	102,3	103,4	66,04	76,15	49,67	37,82
0,305	103,9	105,2	106,5	64,28	75,44	46,68	35,21
0,350	104,4	105,9	109,4	66,32	76,47	49,88	38,14
0,380	105,3	105,3	114,4	64,82	71,12	53,83	38,29
0,399	106,4	104,6	116,2	65,09	71,52	53,90	38,55
0,410	106,0	105,1	117,9	65,26	74,21	50,47	37,45

C_1 , C_2 e C_3 – Circularidades segundo o maior eixo, eixo médio e menor eixo, respectivamente.

De acordo com a Tabela 2.3, é possível observar que tanto a esfericidade quanto a circularidade (independentemente do eixo de referência) apresentaram uma variação aleatória com o aumento do teor de água dos grãos. Para a esfericidade pode-se considerar assim um valor médio de 65,24 %, enquanto que, para a circularidade, esses valores são de 74,09 % para o maior eixo, 50,27 % para o eixo médio e 37,21 % para o menor eixo. É possível notar, pelos resultados dos índices de expansão, que as dimensões características dos grãos de milho se expandem numa proporção diferenciada com o aumento do teor de água. Verifica-se que o aumento volumétrico dos grãos de milho ocorre principalmente na menor dimensão do produto, sendo essa expansão quase três vezes maior que as demais que

apresentaram variações semelhantes. Bayram et al. (2004c) também observaram que a soja apresenta uma expansão desuniforme em suas dimensões características durante o processo de embebição. No entanto, esses autores verificaram que a soja tem uma expansão mais expressiva no sentido do seu maior eixo.

2.3.4 Modelagem da expansão volumétrica

Os valores experimentais dos índices de expansão volumétrica real (unitária) e aparente dos grãos de milho para as quatro temperaturas de hidratação estão apresentados na Tabela 2.4.

De acordo com a Tabela 2.4 é possível verificar que o aumento no volume da massa de grãos de milho foi de (1,592 a 1,620) vezes, e o volume de um grão aumentou entre 1,227 a 1,378 vezes, para as diferentes temperaturas de hidratação utilizadas. Essa faixa de variação volumétrica unitária dos grãos de milho está de acordo com a relatada por Bayran et al. (2004b) que estudaram o processo de hidratação de trigo e verificaram um aumento de (131,6 a 180,4) % para temperaturas variando de (87 a 97) °C. Bayran et al. (2004c) estudaram o processo de embebição em soja e verificaram um aumento de volume unitário de (129,6 a 146,3) % para temperaturas entre (30 e 70) °C. Esses autores também relatam que o aumento de volume foi afetado significativamente pelo tempo e pela temperatura de embebição. Outros fatores como ponto de maturação fisiológica, nível de processamento, tamanho e composição química podem interferir na expansão volumétrica de produtos agrícolas submetidos a embebição (Maskan, 2002).

Tabela 2.4 - Valores experimentais da expansão volumétrica aparente e unitária dos grãos de milho para diferentes teores de água e temperaturas de hidratação de (40, 50, 60 e 70) °C.

Expansão volumétrica aparente							
Temperatura (°C)							
40		50		60		70	
ψ_{ap}	U	ψ_{ap}	U	ψ_{ap}	U	ψ_{ap}	U
1,000	0,159	1,000	0,159	1,000	0,159	1,000	0,159
1,259	0,218	1,231	0,228	1,225	0,234	1,254	0,256
1,313	0,239	1,275	0,256	1,270	0,275	1,288	0,300
1,324	0,260	1,309	0,286	1,314	0,315	1,313	0,338
1,326	0,275	1,320	0,308	1,355	0,344	1,360	0,382
1,341	0,291	1,391	0,336	1,385	0,374	1,383	0,428
1,351	0,313	1,386	0,346	1,435	0,408	1,429	0,465
1,398	0,335	1,425	0,383	1,473	0,447	1,453	0,493
1,429	0,356	1,439	0,403	1,479	0,489	1,485	0,523
1,428	0,371	1,466	0,430	1,491	0,508	1,472	0,530
1,483	0,412	1,509	0,458	1,530	0,558	1,518	0,571
1,488	0,449	1,549	0,506	1,523	0,580	1,532	0,594
1,567	0,501	1,573	0,543	1,573	0,616	1,602	0,644
1,576	0,522	1,579	0,566	1,570	0,635	1,590	0,667
1,624	0,547	1,630	0,597	1,574	0,655	-	-
1,592	0,561	1,620	0,627	-	-	-	-

Expansão volumétrica real							
Temperatura (°C)							
40		50		60		70	
ψ_u	U	ψ_u	U	ψ_u	U	ψ_u	U
1,000	0,166	1,000	0,166	1,000	0,166	1,000	0,166
1,079	0,189	1,091	0,275	1,208	0,296	1,090	0,296
1,115	0,318	1,159	0,401	1,179	0,487	1,171	0,438
1,137	0,410	1,178	0,471	1,227	0,559	1,222	0,538
1,208	0,545	1,214	0,528	1,276	0,600	1,287	0,614
1,227	0,488	1,250	0,580	1,436	0,668	1,309	0,665
-	-	1,285	0,600	1,378	0,686	1,336	0,694

U – Teor de água (decimal, b.s.).

Os resultados dos parâmetros estatísticos utilizados para a modelagem da expansão volumétrica real e aparente dos grãos de milho estão apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Coeficientes de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e distribuição do resíduo (DR) dos modelos utilizados para modelagem da expansão volumétrica aparente e unitária dos grãos de milho.

Temperatura (°C)	Parâmetros Estatísticos	Modelos						
		2.6	2.7	2.8	2.9	2.10	2.11	2.12
Parâmetros da modelagem da expansão volumétrica aparente								
40	P (%)	6,0513	3,0582	2,7326	2,5793	2,4089	6,0507	0,9835
	SE (% b.s.)	0,1030	0,0670	0,0572	0,0523	0,0469	0,0995	0,0184
	R^2 (%)	59,43	82,83	87,49	89,54	91,61	89,54	98,35
	DR	T	T	T	T	T	T	A
50	P (%)	4,9587	3,3787	2,1812	2,5043	1,5118	4,9580	0,5877
	SE (% b.s.)	0,0855	0,0691	0,0541	0,0466	0,0288	0,0825	0,0126
	R^2 (%)	75,50	83,99	90,18	92,72	97,73	75,50	99,42
	DR	T	T	T	T	T	T	A
60	P (%)	4,9776	3,6552	2,9658	2,7184	1,2376	4,9770	0,5637
	SE (% b.s.)	0,0856	0,0717	0,0573	0,0506	0,0250	0,0824	0,0106
	R^2 (%)	73,33	81,27	88,03	90,68	97,73	73,35	99,59
	DR	T	T	T	T	A	T	A
70	P (%)	3,3054	2,9494	2,1714	2,0791	1,6548	3,3048	0,8213
	SE (% b.s.)	0,0631	0,0595	0,0451	0,0389	0,0326	0,0607	0,0152
	R^2 (%)	85,38	87,03	92,53	94,45	96,11	85,39	99,08
	DR	T	T	T	T	T	T	A
Parâmetros da modelagem da expansão volumétrica unitária								
40	P (%)	0,0397	0,0322	0,0316	0,0312	0,0360	0,0355	0,0279
	SE (% b.s.)	2,2615	2,1893	2,1440	2,0938	1,8376	2,2584	1,5936
	R^2 (%)	82,05	88,24	88,62	88,91	85,21	82,09	91,13
	DR	A	A	A	A	A	A	A
50	P (%)	0,0156	0,0189	0,0150	0,0146	0,0151	0,0143	0,0157
	SE (% b.s.)	0,9843	1,2002	1,0792	1,0267	0,9273	0,9842	0,8100
	R^2 (%)	97,85	96,85	98,01	98,13	97,86	97,85	98,26
	DR	A	T	A	A	A	A	A
60	P (%)	0,0715	0,0654	0,0686	0,0699	0,0716	0,0656	0,0790
	SE (% b.s.)	3,6624	3,9467	4,1072	4,2345	3,7057	3,8241	4,0239
	R^2 (%)	78,95	82,37	80,61	83,08	78,86	78,71	79,42
	DR	T	T	A	A	A	A	A
70	P (%)	0,4031	1,2568	3,7985	0,4181	1,7969	0,3994	0,3955
	SE (% b.s.)	0,0073	0,0190	0,0633	0,0071	0,0266	0,0066	0,0072
	R^2 (%)	99,71	84,11	99,64	99,72	96,11	99,71	99,72
	DR	A	T	A	A	A	A	A

Sendo: T – Tendencioso e A – Aleatório.

Considerando os parâmetros da modelagem da expansão volumétrica aparente apresentados na Tabela 2.5, é possível observar que os modelos 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10 e 2.11 apresentaram uma distribuição tendenciosa dos resíduos para praticamente todas as temperaturas de embebição. Diante disso, verificou-se que os modelos tradicionalmente utilizados para a modelagem da variação volumétrica de produtos não se ajustaram satisfatoriamente aos dados observados. Assim, propôs-se uma equação empírica (Equação 2.12) que se ajustou satisfatoriamente apresentando uma distribuição do resíduo aleatória para todas as condições de hidratação, conforme pode ser verificado na Figura 2.6. O modelo proposto também apresentou altos valores do coeficiente de determinação (maiores que 98,2 %) e valores do erro médio relativo e do desvio padrão da estimativa inferior a todos os outros modelos. Desta forma, o modelo proposto neste trabalho (Equação 2.12) foi o recomendado para representar o fenômeno da expansão volumétrica aparente dos grãos de milho durante o processo de embebição.

Observou-se ainda que para a modelagem da expansão volumétrica real (unitária), à exceção dos modelos 2.6 e 2.7 (modelos Corrêa e Bala e Woods, respectivamente), todos os outros modelos se ajustaram bem aos dados experimentais, apresentando uma distribuição aleatória do resíduo para todas as temperaturas analisadas. Todavia, os modelos 2.9, 2.11 e 2.12 (modelos Linear, Rhaman e proposto, respectivamente) foram os que apresentaram, de um modo geral, os maiores valores para o coeficiente de determinação e menores valores do desvio padrão da estimativa e erro médio relativo, resultando em melhores ajustes aos dados experimentais. Sendo assim, a seleção do melhor modelo baseou-se na sua simplicidade. Dentre os modelos que apresentaram os melhores resultados (2.9, 2.11 e 2.12), o modelo 2.11 (Rahman) foi o escolhido para descrever a expansão volumétrica unitária dos grãos de milho, por ser o mais simples, além de ser um modelo tradicionalmente utilizado em trabalhos de modelagem de variação volumétrica de produtos agrícolas.

Na Figura 2.7 estão apresentadas as distribuições de resíduos dos modelos que melhor representaram o fenômeno para todas as temperaturas.

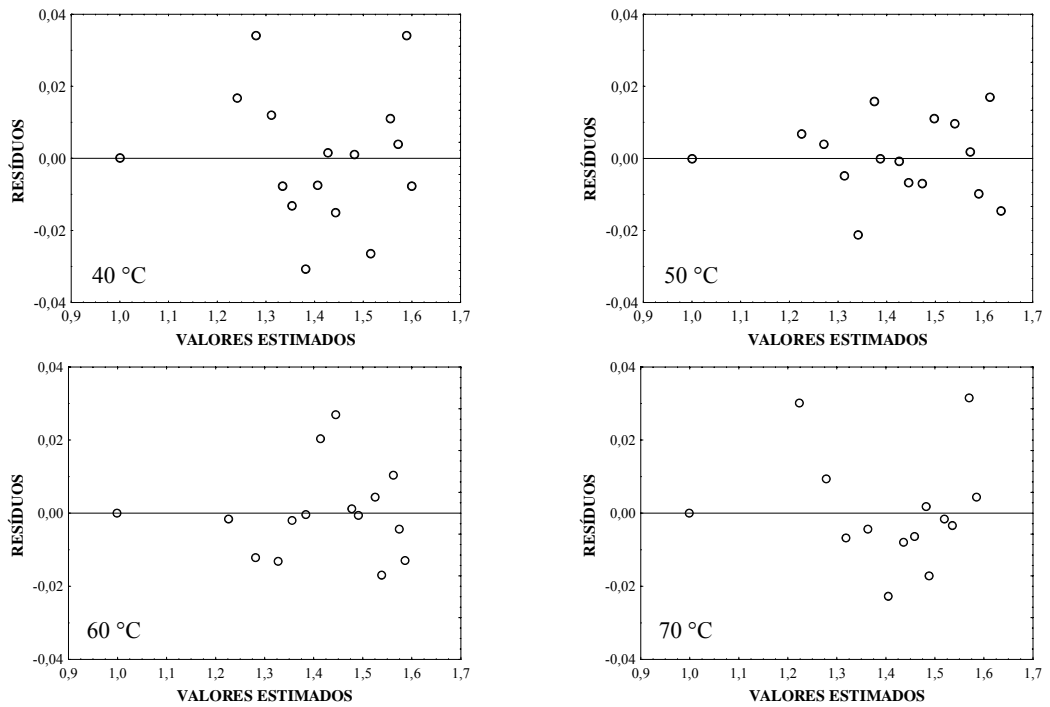


Figura 2.6: Comportamento da distribuição de resíduos do modelo proposto (Equação 2.12) na modelagem do processo de expansão volumétrica aparente dos grãos de milho nas temperaturas de (40, 50, 60 e 70) °C.

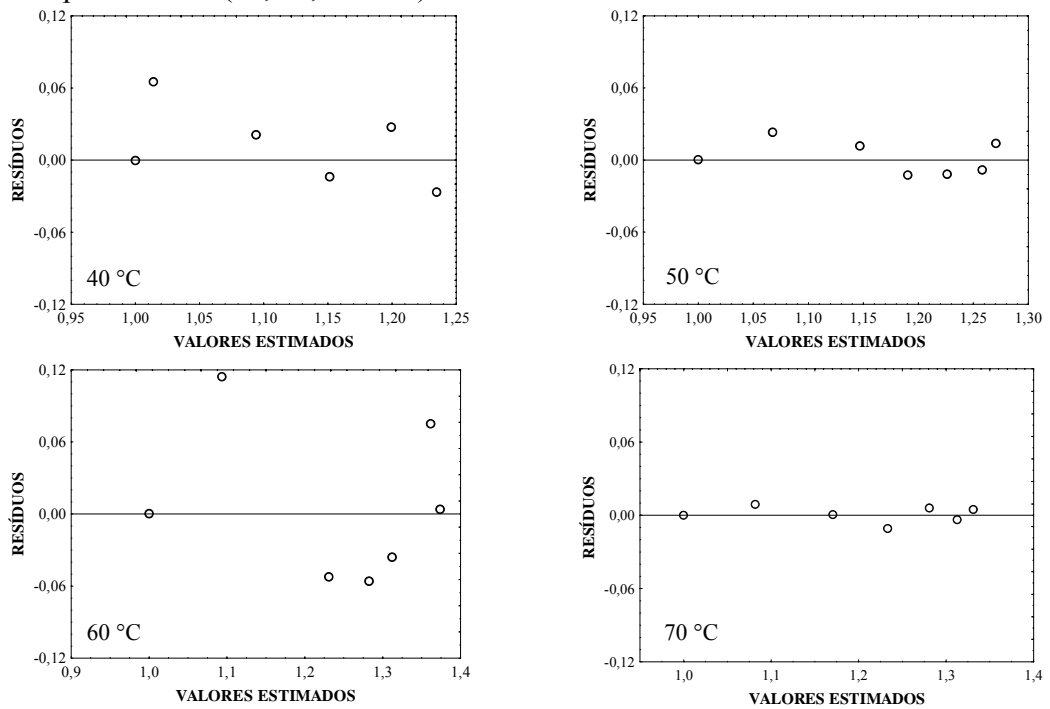


Figura 2.7: Comportamento da distribuição de resíduos do modelo de Rahman (Equação 2.11) na modelagem do processo de expansão volumétrica unitária dos grãos de milho nas temperaturas de (40, 50, 60 e 70) °C.

Na Tabela 2.6 estão apresentados o modelo de Rahman e o modelo proposto, com seus respectivos coeficientes estimados para descrever a expansão volumétrica unitária e aparente, respectivamente, dos grãos de milho durante o processo de embebição, nas diferentes temperaturas utilizadas.

Tabela 2.6 - Modelo de Rahman e o modelo proposto com seus coeficientes ajustados para descrever a expansão volumétrica aparente e unitária do milho nas temperaturas de (40, 50, 60 e 70) °C.

Temperatura (°C)	Modelos	
	Proposto	Rahman
40	$\psi_{ap} = 1 + 0,924071(U - U_0)^{0,473791}$	$\psi_u = 1 + 0,618135(U - U_0)$
50	$\psi_{ap} = 1 + 0,958954(U - U_0)^{0,543111}$	$\psi_u = 1 + 0,623306(U - U_0)$
60	$\psi_{ap} = 1 + 0,834915(U - U_0)^{0,503842}$	$\psi_u = 1 + 0,719527(U - U_0)$
70	$\psi_{ap} = 1 + 0,869536(U - U_0)^{0,581705}$	$\psi_u = 1 + 0,626838(U - U_0)$

Os coeficientes do modelo Rahman e do modelo proposto apresentados na Tabela 2.6 não apresentaram nenhuma tendência de variação com a temperatura, sendo então inadequada sua descrição em função da temperatura.

2.4 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, nas condições em que foram realizados os experimentos, conclui-se que:

- As massas específicas aparente e unitária dos grãos de milho variaram numa relação quadrática com o teor de água, e a porosidade aumentou linearmente até atingir o teor de água de 0,410 (decimal b.s.), mantendo-se constante para maiores teores;

- A expansão volumétrica unitária dos grãos de milho durante a embebição ocorre de maneira desuniforme nas suas dimensões características, e a maior variação ocorre no sentido da menor dimensão característica;
- A circularidade e a esfericidade dos grãos de milho não variaram com o teor de água;
- Nenhum dos modelos tradicionalmente usados para prever a variação volumétrica de produtos agrícolas se ajustou satisfatoriamente aos dados observados da expansão volumétrica aparente dos grãos de milho, sendo proposto um novo modelo que se ajustou satisfatoriamente aos dados experimentais; e
- O modelo de Rahman foi o que melhor representou os dados da expansão volumétrica unitária.

2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABALONE, R.; CASSINERA, A.; GASTÓN, A.; LARA, M. A. Some Physical Properties of Amaranth Seeds. **Biosystems Engineering**, v. 89 (1), p. 109 - 117, 2004.

BALA, B. K.; WOODS, J. L.; Simulation of deep bed malt drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 30 (3), p. 235 - 244, 1984.

BARYEH, E. A. Physical properties of millet. **Journal of Food Engineering**, v. 51, p. 39 - 46, 2002.

BAYRAM, M.; ÖNER, 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.; ÖNER, M. D.; EREN, S. thermodynamics of the dimensional changes in the wheat kernel during cooking for bulgur production, **Food Science and Technology International**, v. 10 (4), p. 243 - 253, 2004b.

BAYRAM, M.; ÖNER, 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, 2004c.

- 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.
- CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; RESENDE, O.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; GONELI, A.L.D. Mathematical modelling for representation of coffee berry volumetric shrinkage. **In:** Proceeding of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004). São Paulo. Brazil, v. A, p. 742 - 747, 2004.
- GONELI, A. L. D. G. Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento. 2008. 188 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- JAIN, R. K.; BAL, S. Properties of pearl millet **Journal Agricultural Engineering Research**, v. 66, p. 85 - 91, 1997.
- KARABABA, E. Physical properties of popcorn kernels. **Journal of Food Engineering**, v. 72, p. 100 - 107, 2006.
- KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. **Drying Technology**, v. 15 (10), p. 2441 - 2458, 1997.
- LANG, W.; SOKHANSANJ, S. Bulk volume shrinkage during drying of wheat and canola. **Journal of Food Process Engineering**, v. 16 (4), p. 305 - 314, 1993.
- LEWICKI, P. P. Some remarks on rehydration of dried foods. **Journal of Food Engineering**, v. 36 (1), p. 81 - 87, 1998.
- LEWICKI, P. P.; WITROWA-RAJCHERT, D.; MARIAK, J. Changes of structure during rehydration of dried apples. **Journal of Food Engineering**, v. 32 (4), p. 347 - 350, 1997.
- LOPES FILHO, J. F.; RAMOS, A. P.; ROMERO, J. T. Difusividade da água, dióxido de enxofre e ácido láctico em grãos de milho durante a maceração para o processo de moagem úmida. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 9 (4), p. 257 - 263, 2006.
- LOZANO, J.E.; ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M.J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture content. **Journal of Food Science**, v. 48 (5), p. 1497 - 1502, 1983.
- MANIMEHALAI, N.; VISWANATHAN, R. Physical properties of fuzzy cottonseeds. **Biosystems Engineering**, v. 95 (2), p. 207 - 217, 2006.
- MASKAN, M.; Effect of processing on hydration kinetics of three wheat products of the same variety. **Journal of Food Engineering**, v. 52 p. 337 - 341, 2002.
- MASKAN, M. Effect of maturation and processing on water uptake characteristics of wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 47, p. 51 - 57, 2001.
- MAYOR, L.; SERENO, A.M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 373 - 386, 2004.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying, **Drying Technology**, v. 20, p. 1503 - 1513, 2002.

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986, 841 p.

MURAMATSU, Y.; TAGAWA, A.; KASAI, T.; TAKEYA, K. Volume changes of wheat and barley soaking in water. **Journal of Food Engineering**, v. 73, p. 364 - 369, 2006.

PELEG, M. An empirical model for description of moisture sorption curves. **Journal of Food Science**, v. 53 (4), p. 1216 - 1219, 1988.

RAHMAN, S. **Food Properties Handbook**. Boca Ratón, Florida, CRC Press LLC, 1995, 500 p.

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

RIBEIRO D. M., CORRÊA P. C., RODRIGUES D. H., GONELI, A. L. Análise da variação das propriedades físicas dos grãos de soja durante o processo de secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25 (3), p. 611 - 617, 2005.

SOKHANSANJ, S.; LANG, W. Prediction of kernel and bulk volume of wheat and canola during adsorption and desorption. **Journal Agricultural Engineering Research**, v. 63 (2), p. 129 - 136, 1996.

TAGAWA, A.; MURAMATSU, Y.; NAGASUNA, T.; KASAI, T.; IIMOTO, M., MURATA, S. Volume change of kidney beans soaking in water. **Transactions of the ASAE**, v. 45 (5), p. 1505 - 1510, 2002.

YADAV, B. K.; JINDAL, V. K. Modeling changes in milled rice (*Oryza sativa L.*) kernel dimensions during soaking by image analysis. **Journal of Food Engineering**, v. 80, p. 359 - 369, 2007.

YALÇIN, İ.; ÖZARSLAN, C.; AKBAS, T. Physical properties of pea (*Pisum sativum*) seed. **Journal of Food Engineering**, v. 79, 731 - 735, 2007.

CAPÍTULO 3

Avaliação das propriedades mecânicas dos grãos de milho submetidos a embebição em diferentes níveis de danificação mecânica

3.1 INTRODUÇÃO

O milho é uma das culturas mais importantes na economia brasileira e do mundo, não só pelo seu uso potencial na produção zootécnica, mas também pelas grandes possibilidades de sua utilização na indústria de alimentos e mais recentemente na produção de álcool.

Na indústria de alimentos, o processo de embebição é um passo essencial para a produção de tradicionais produtos derivados de alguns grãos como trigo, soja e milho. Este processo é caracterizado por mudanças na textura dos grãos que são necessárias para facilitar separação de suas partes principais.

A maioria dos produtos podem ser reidratados por imersão em água, de acordo com o seu processamento. A reidratação é um processo complexo em que acontece a adequada reconstituição das propriedades do material previamente seco (Marabi et al., 2006). Durante a embebição, ocorrem simultaneamente três importantes processos: o ganho de água pelo produto, seu aumento de volume (inchamento) e a lixiviação de solutos. A reidratação de produtos agrícolas é empregada como um parâmetro para determinar sua qualidade, pois dá um indicativo do grau das alterações que ocorreram durante as etapas de seu processamento (beneficiamento e secagem, por exemplo). Neste contexto a textura é uma importante

característica a ser analisada como forma de obter uma otimização no processamento de alimentos (Moreira et al., 2008).

Liu (1997) verificou que as mudanças na textura que ocorrem devido à absorção de água pelo processo de embebição afetam diretamente a moagem e a extração do concentrado proteico de soja. Henry et al. (2000a), estudando a resistência da soja à compressão em três orientações e quatro teores de água, observaram que, ao comprimir o grão, a força de ruptura perpendicular à divisão dos cotilédones foi maior quando comparada às outras orientações, e que a capacidade da soja em resistir à compressão diminuiu com o aumento do teor de água. Resultados semelhantes foram encontrados por Ogunjimi et al. (2002) e por Resende et al. (2007), que concluíram que os grãos de feijão resistem de forma diferente às cargas de compressão de acordo com sua orientação e teor de água.

De um modo geral, nos trabalhos referentes às propriedades mecânicas de produtos agrícolas, os pesquisadores relatam que a deformação para uma determinada carga de compressão é função principalmente do teor de água. Normalmente, quanto maior o teor de água, menor a força necessária para uma mesma deformação. No entanto, fatores, como características físicas do produto, seu estágio de maturação, temperatura do ar de secagem e velocidade de compressão também são relatados (Moreira et al., 2008; Corrêa et al., 2008; Pan e Tangratavalee, 2003; Güner et al., 2003; Ribeiro et al., 2007, Saiedirad et al., 2008; Henry, 2000a; White et al., 1982).

O estudo das características mecânicas dos produtos agrícolas é imprescindível para que os equipamentos possam ser desenvolvidos com vistas a atingir a máxima eficiência sem, contudo, comprometer a qualidade final do produto.

Pelas relações obtidas entre a deformação e a força correspondente, por meio de testes de compressão, podem-se obter parâmetros que caracterizam a resposta do material quando submetido a uma carga. Para material não-biológico de forma geométrica regular, ao dividir a força pela área da seção transversal e a deformação pelo seu comprimento inicial, obtém-se a curva “deformação-tensão específica”. Para grande número de materiais, o comportamento inicial da curva de “deformação-tensão específica” é linear (elástico), sendo a inclinação da reta denominada módulo de elasticidade ou de Young, único para cada material. No caso de corpos convexos (grãos, frutos e vegetais intactos), a determinação do módulo de elasticidade por meio das curvas de “deformação-força”, obtidas de testes de compressão entre placas paralelas, torna-se mais complexa. O contorno

convexo do produto faz com que as áreas de contato entre o material e as placas variem de acordo com a deformação do produto (Ribeiro et al., 2007).

Dentre as diversas propriedades mecânicas, o módulo de deformidade permite que se realizem comparações de resistência relativa entre os diversos materiais. Para determinação do módulo de deformidade do produto, faz-se a separação da sua deformação total nas duas componentes: elástica e plástica. Desta forma, com a obtenção de curvas de deformação *versus* força durante a aplicação de cargas ao produto e considerando a sua deformação total, obter-se-á o módulo de deformidade total do produto. Segundo Couto et al. (2002), no estudo do comportamento mecânico de um material, o módulo de deformidade é considerado mais significativo que o de elasticidade, visto que, quando um produto é comprimido, a deformação total é que tem aplicação prática.

Henry et al. (1996) relataram que a relação entre uma determinada força e a deformação que esta provoca em materiais biológicos pode ser descrita pela Equação 3.1.

$$F(x) = dx + ex^2 + fx^3 \quad (3.1)$$

em que:

x : deformação, mm;

d, e e f : Coeficientes elásticos do modelo, $N\text{ mm}^{-1}$, $N\text{ mm}^{-2}$, $N\text{ mm}^{-3}$, respectivamente; e

F : força, N.

Esta relação tem sido utilizada por diversos autores com resultados satisfatórios para descrever o comportamento mecânico de diversos produtos (Corrêa, et al., 2008; Pan e Tangratanavalee, 2003; Ribeiro et al., 2007, Henry et al., 2000a; Henry et al., 1996)

A Figura 3.1 ilustra a curva de deformação *versus* força representada de acordo com a Equação 3.1. 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.

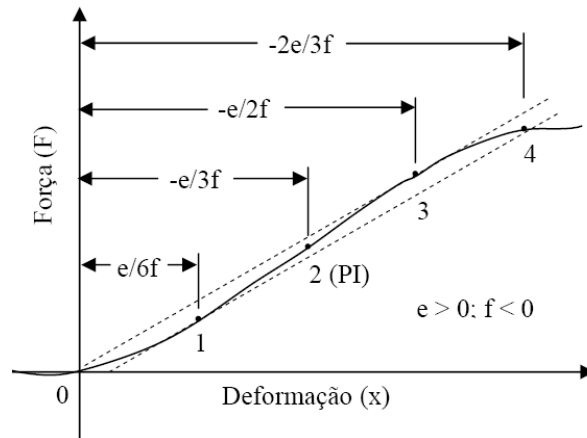


Figura 3.1: Representação esquemática da curva força *versus* deformação do modelo $F(x) = dx + ex^2 + fx^3$ (Henry et al., 1996).

Baseando-se na curva deformação *versus* força descrita por meio da Equação 3.1, a inclinação da reta tangente (\tan) para um ponto qualquer pode ser obtida a partir da sua derivada.

$$\tan(x) = \frac{dF(x)}{dx} = d + 2ex + 3fx^2 \quad (3.2)$$

A tangente máxima é obtida no ponto de inflexão da curva, correspondente ao ponto em que $x = -e/3f$, sendo considerada um indicador da dureza do produto.

A secante é a inclinação da reta que passa pela origem e por um ponto qualquer da curva, sendo expressa pela seguinte forma:

$$S(x) = d + ex + fx^2 \quad (3.3)$$

em que:

S: secante, N mm^{-1} .

A secante máxima corresponde ao ponto em que o valor de deformação correspondente ao ponto em que $x = -e/2f$, 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 grãos de soja, colhidas em duas diferentes épocas. Os autores observaram que os módulos máximos da tangente e secante diminuíram com o aumento do teor de água, o que também foi observado por Corrêa et al. (2008) para grãos de feijão vermelho e por Goneli (2008) para grãos de mamona.

Na Figura 3.2 estão apresentadas as curvas de deformação-força típicas para alimentos (Bourne, 2002). A maioria dos produtos apresenta comportamento semelhante à curva *A*, que é côncava em relação ao eixo y . Esta curva é típica de produtos tais como *marshmallows*, frutos e vegetais maduros. A curva *B* descreve o comportamento de produtos rígidos, tais como sementes com tegumento endurecido, frutos, vegetais verdes e ovos. Estes produtos obedecem à lei de Hooke, que estabelece que a deformação de um corpo é diretamente proporcional à força aplicada nele. A curva *C*, que tem formato de “S”, é típica para pães, doces, bolos, alguns queijos, grãos e outros alimentos porosos.

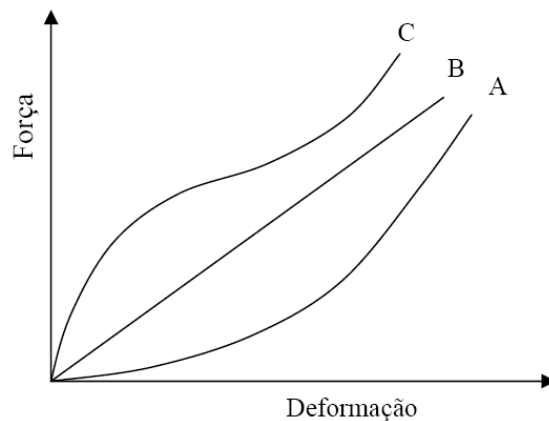


Figura 3.2: Curvas características do comportamento força-deformação para alimentos (Bourne, 2002).

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho investigar as mudanças no comportamento mecânico dos grãos de milho submetidos ao processo de embebição com diferentes níveis de danificação mecânica.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado 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).

3.2.1 *Matéria-prima*

O milho (*Zea mays* L.), cultivar AG 1510, foi adquirido de um produtor rural da região de Viçosa (MG). Os grãos foram colhidos e debulhados manualmente e passaram por um processo de limpeza com uso de peneiras tendo sido retiradas as impurezas, grãos defeituosos e materiais estranhos.

O produto possuía inicialmente um teor de água de aproximadamente 0,250 (decimal b.s.) e os grãos foram secos em estufa com circulação forçada de ar à 45 °C até um teor de água de 0,142 (decimal b.s.). O teor de água foi determinado em estufa com circulação forçada de ar a 105 ± 1 °C por 24 h em três amostras de 40 g, segundo Brasil, (1992), com modificações.

3.2.2 *Danificação mecânica*

Para a indução da danificação mecânica nos grãos de milho, foi utilizado como fonte impactadora um *Stein Breakage Tester*, modelo CK2-M (Figura 3.3). Esse aparelho possui um cilindro de aço e uma hélice central que gira em rotação constante de 1800 rpm, e que, ao girar, lança o produto contra a parede do cilindro promovendo o impacto e o esforço de abrasão.

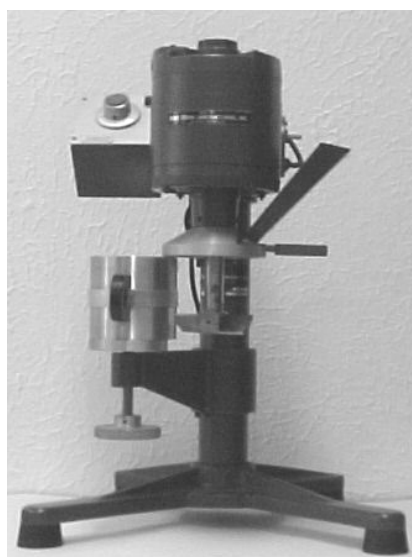


Figura 3.3: *Stein Breakage Tester* usado na simulação dos danos mecânicos.

As amostras de milho foram submetidas à danificação mecânica nos tempos de [0 (testemunha), 1, 2, 3 e 4] min.

O nível de danificação mecânica foi avaliado pela condutividade elétrica da solução com os exudados dos grãos de milho. Para este teste foram contadas e pesadas quatro subamostras de cinquenta 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 h. Depois desse período, foram efetuadas as medidas de condutividade elétrica nas soluções das amostras danificadas por meio de um condutivímetro portátil da marca Digimed, modelo DM3.

3.2.3 *Embebição do milho*

Para o processo de hidratação (maceração ou embebição), foram utilizadas amostras de 40 g de milho em três repetições. As amostras foram colocadas em frascos herméticos de 150 mL contendo uma solução de 0,2 % de dióxido de enxofre (SO₂) e 0,55 % de ácido láctico (C₃H₆O₃) em água destilada, proporcionando uma relação entre produto e solução de aproximadamente 1:3. A solução e a proporção utilizadas para o processo de hidratação referem-se à etapa de maceração convencional a que o milho é submetido no processamento via úmida, sendo essa relação de pelo menos 1:2. A solução foi obtida adicionando 5,9 g de metabissulfito de sódio (Na₂S₂O₅) e 11 mL de ácido láctico (C₃H₆O₃) em 2 L de água destilada (Lopes Filho et al., 2006).

As amostras utilizadas nos testes de danificação mecânica foram submetidas à hidratação à temperatura controlada de 50 °C, e o acompanhamento de suas massas foi feito em balança digital com resolução de 0,01 g, em intervalos de tempo pré-determinados durante 12 h. Os diferentes teores de água foram obtidos pela diferença de massa.

3.2.4 Propriedades mecânicas

Os ensaios de compressão uniaxiais foram realizados em um Aparelho Universal de Testes, *TA.HD Texture Analyser, Stable Micro Systems*, também conhecido como texturômetro, dotado do programa *Texture Expert for Windows*[®] com uma célula de carga de 500 N.

Os testes de compressão foram realizados nos grãos de milho obtidos ao longo do processo de absorção para cada nível de danificação mecânica. Para cada condição de hidratação, foram utilizados dez grãos de milho, que foram comprimidos individualmente na sua posição natural de repouso a uma taxa de aplicação da força de 0,5 mm s⁻¹. Baseado em testes preliminares, para os cálculos das propriedades mecânicas foi utilizada uma deformação específica nos grãos de milho de 1 mm. As relações da força com a deformação foram fornecidas pelo programa *Texture Expert for Windows*[®], que acompanha o Aparelho Universal de Testes. Este programa ainda fornece os valores da área abaixo da curva, ou seja, a energia (ou trabalho) exercida para uma dada deformação específica.

O módulo proporcional de deformidade ou de deformação foi calculado, utilizando-se a Equação 3.4, proposta por Couto et al. (2002).

$$Ep = \frac{-E}{1 - \mu^2} = \frac{0,531F}{\chi^{\frac{3}{2}}} \left[2 \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R_c} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (3.4)$$

em que:

Ep : módulo proporcional de deformidade, Pa;

E : módulo de deformidade, Pa;

F : força, N;

μ : razão de Poisson, adimensional;

R_c : raio de curvatura no ponto de contato, m;

r : raio equivalente do produto, m; e
 χ : deformação total (elástica e plástica) do produto, m.

O raio equivalente (r) e o de curvatura (R_c) dos grãos foram obtidos segundo as aproximações descritas pelas Equações 3.5 e 3.6, para corpos convexos (ASAE, 2001).

$$R_c \cong \frac{c^2 + a^2/4}{2c} \quad (3.5)$$

$$r \cong \frac{c}{2} \quad (3.6)$$

em que:

a : maior dimensão característica do grão, m; e

c : menor dimensão característica do grão, m.

O módulo de resiliência, definido como a capacidade de um material absorver energia quando deformado elasticamente e liberá-la quando descarregado, foi obtido segundo equação descrita por Olaniyan e Oje (2002) que relaciona a energia necessária para uma dada deformação e o volume do grão (Equação 3.7).

$$\gamma = \frac{\xi}{V_g} \quad (3.7)$$

em que:

γ : módulo de resiliência específico, mJ mm^{-3} ;

ξ : energia específica, mJ; e

V_g : volume do grão.

Para cálculo do volume, os grãos de milho foram assumidos como conoesféricos (similar a uma gota de um líquido), possuindo uma base esférica com superfície plana e um cone de base arredondada na porção de corte da esfera, de acordo com o esquema apresentado na Figura 3.4 (Jain e Bal, 1997).

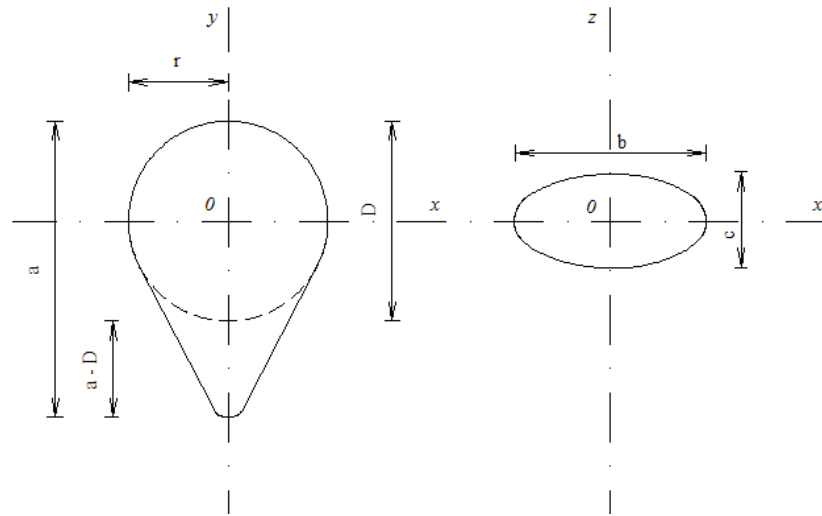


Figura 3.4: Forma cono esférica dos grãos de milho.

O volume dos grãos de milho foi estimado pela Equação 3.8:

$$V_g = \frac{\pi a^2 (bc)}{6 [2a - (bc)^{1/2}]} \quad (3.8)$$

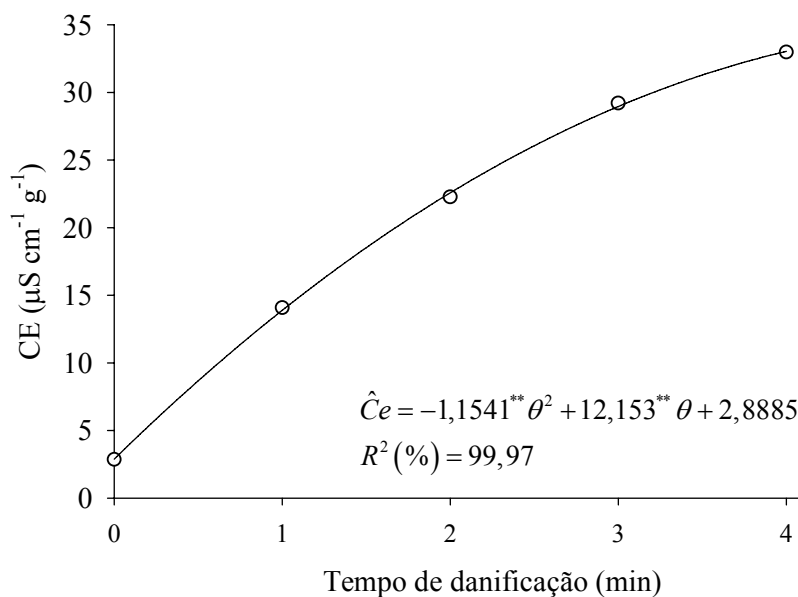
em que:

- V_g : volume do grão, mm^3 ;
- a : maior dimensão do grão, mm; e
- b : dimensão média característica do grão, mm; e
- c : menor dimensão característica do grão.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Nível de danificação mecânica dos grãos de milho

A Figura 3.5 apresenta os valores médios da condutividade elétrica obtidos a partir da danificação mecânica induzida nos grãos de milho.



**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste “t”

Figura 3.5: Valores médios da condutividade elétrica (CE) dos grãos de milho submetidos a [0 (testemunha), 1, 2, 3 e 4] min de danificação mecânica.

Os valores da condutividade elétrica aumentaram significativamente numa relação quadrática com o aumento do tempo de danificação dos grãos de milho. Esses valores são exatamente de (2,847; 14,077; 22,261; 29,194 e 32,971) $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$, para os tempos de (0, 1, 2, 3 e 4) min, respectivamente. Verifica-se pela significância dos parâmetros do modelo e pelo alto valor do coeficiente de determinação ($R^2 > 99,97\%$), que houve boa correspondência entre os diferentes tempos de danificação mecânica induzida e os valores de condutividade elétrica. Os valores da condutividade elétrica aumentaram mais de 11,5 vezes considerando a testemunha e o máximo nível de danificação induzida, podendo assim ser verificado que o teste proposto para induzir a danificação mecânica nos grãos de milho teve resultados satisfatórios. Valores nessa faixa de condutividade também foram observados por Fessel et al. (2006) para grãos de milho armazenados entre doze e dezesseis meses numa temperatura de 30 °C.

3.3.2 Propriedades mecânicas

A Figura 3.6 apresenta os valores médios observados da força máxima necessária para promover uma deformação específica de 0,001 m nos grãos de milho submetidos a

uma compressão uniaxial na posição natural de repouso com diferentes teores de água e em diferentes níveis de danificação mecânica.

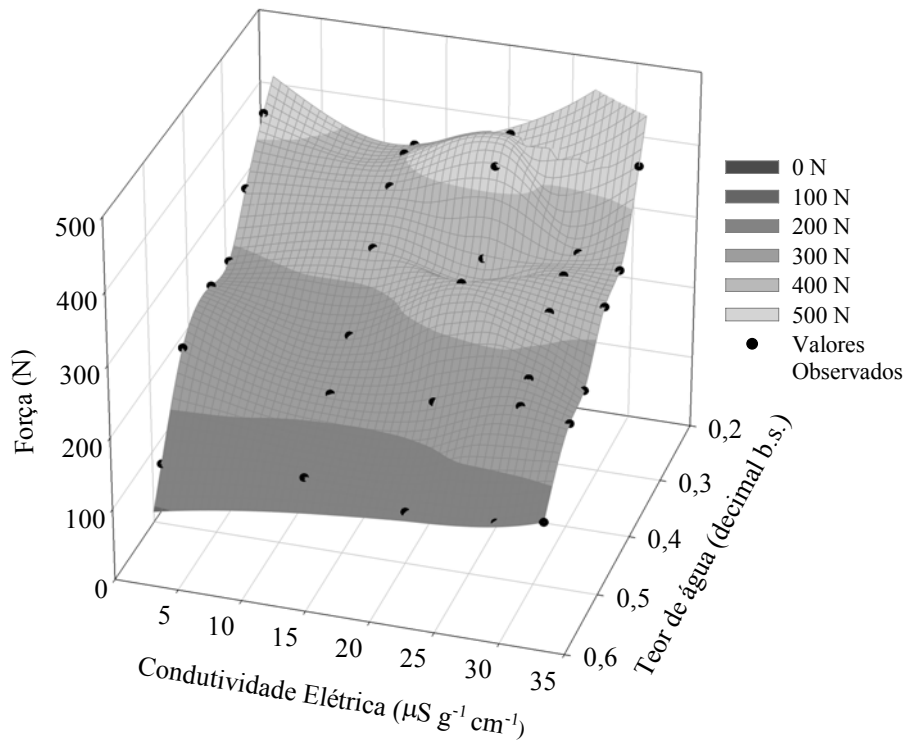


Figura 3.6: Valores médios observados da força máxima de compressão, para os grãos de milho na posição natural de repouso, em função do teor de água e do nível de danificação mecânica, para uma deformação específica de 0,001 m.

Nota-se na Figura 3.6 que os valores da força resistida à deformação de 0,001 m, pelos grãos de milho, variaram entre (446,1 e 144,6) N para uma faixa de teor de água entre (0,2585 e 0,5878) (decimal b.s.) e para valores de danificação mecânica avaliados indiretamente pela condutividade elétrica, entre (2,8466 e 32,971) $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$.

As variações da força resistida pelos grãos foram devidas principalmente às variações no seu teor de água. Apesar de o produto ter sido submetido ao teste de compressão com diferentes níveis de danificação mecânica, essa variável não se mostrou efetiva em promover uma variação da capacidade dos grãos de milho em resistir à carga de compressão. Um dos motivos a que pode ser atribuído este fato é que os grãos de milho, na sua posição natural de repouso, têm uma menor susceptibilidade à deformação, mesmo apresentando danificações físicas (como trincas por exemplo).

De fato, normalmente os grãos se comportam de forma diferenciada quando submetidos a cargas de compressão em diferentes posições. Resende et al. (2007) observaram que os grãos de feijão exibem uma maior resistência às cargas de compressão quando estas são aplicadas na direção perpendicular à divisão dos cotilédones (posição natural de repouso). Comportamento semelhante foi observado por Güner et al. (2003) para nozes de avelã, que também apresentaram uma maior força de ruptura da casca para a posição natural de repouso. No entanto Oloso e Clarke (1993) estudaram as propriedades mecânicas de castanhas de caju com e sem danificação mecânica e verificaram que além do teor de água, produtos com danificações na casca apresentaram um decréscimo na força de ruptura.

A Figura 3.7 apresenta os valores médios observados do módulo proporcional de deformidade (MPa) em função dos teores de água e do nível de danificação mecânica dos grãos de milho, para uma deformação específica de 0,001 m.

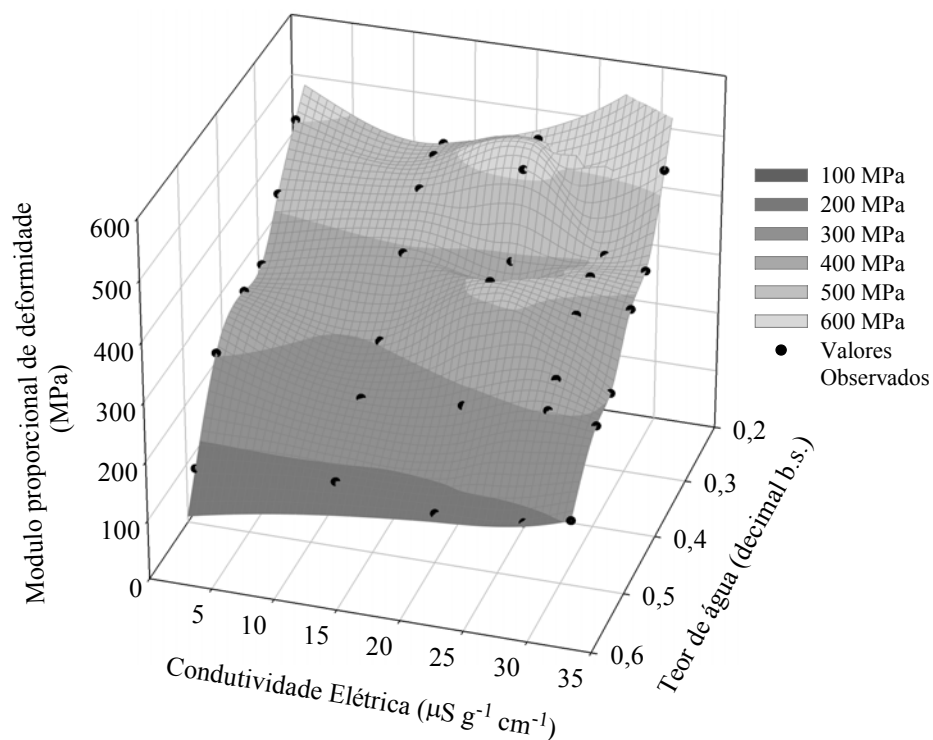


Figura 3.7: Valores médios observados do módulo proporcional de deformidade, para os grãos de milho na posição natural de repouso, em função do teor de água e do nível de danificação mecânica para uma deformação específica de 0,001m.

Pela Figura 3.7, observa-se que o módulo proporcional de deformidade apresentou comportamento semelhante ao da força de compressão. Este parâmetro se mostrou dependente principalmente em função do teor de água não variando em relação ao nível de danificação física do produto.

Couto et al. (2002) argumentam que quanto maior o módulo proporcional de deformidade, maior a força necessária para promover uma determinada deformação em um produto. Os valores do módulo proporcional de deformidade diminuíram de (532,76 a 165,90) MPa para uma variação do teor de água de (0,2585 a 0,5878) (decimal, b.s.) e para valores de danificação mecânica, avaliados indiretamente pela condutividade elétrica, entre (2,8466 e 32,971) $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$. Comportamento semelhante em relação ao teor de água foi observado por Batista et al. (2003), Ribeiro et al. (2007), por Corrêa et al. (2008) e por Goneli (2008), trabalhando com frutos de café, grãos de soja e grãos de feijão vermelho e grãos de mamona, respectivamente. Os valores encontrados nesse trabalho são superiores aos relatados por esses autores, conforme pode ser verificado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Valores de para fins de comparação do módulo proporcional de deformidade (E_p) para diferentes produtos em sua posição natural de repouso em diferentes teores de água.

Produto	E_p (Mpa)	Teor de água (decimal, b.s.)	Referência
Mamona	46,09 - 140,01	0,08 - 0,66	Goneli (2008)
Soja	23,1 - 106,9	0,14 - 0,42	Ribeiro et al. (2007)
Frutos de café cereja	10 - 30	1,86	Couto et al. (2002)
Frutos de café verde	70 - 150	3,05	Couto et al. (2002)
Feijão vermelho	41 - 713	0,08 - 0,66	Corrêa et al. (2008)

As Figuras 3.8 e 3.9 apresentam os valores observados da energia e do módulo de resiliência referentes a uma deformação específica de 0,001 m nos grãos de milho submetidos a uma compressão uniaxial na posição natural de repouso com diferentes teores de água e em diferentes níveis de danificação mecânica.

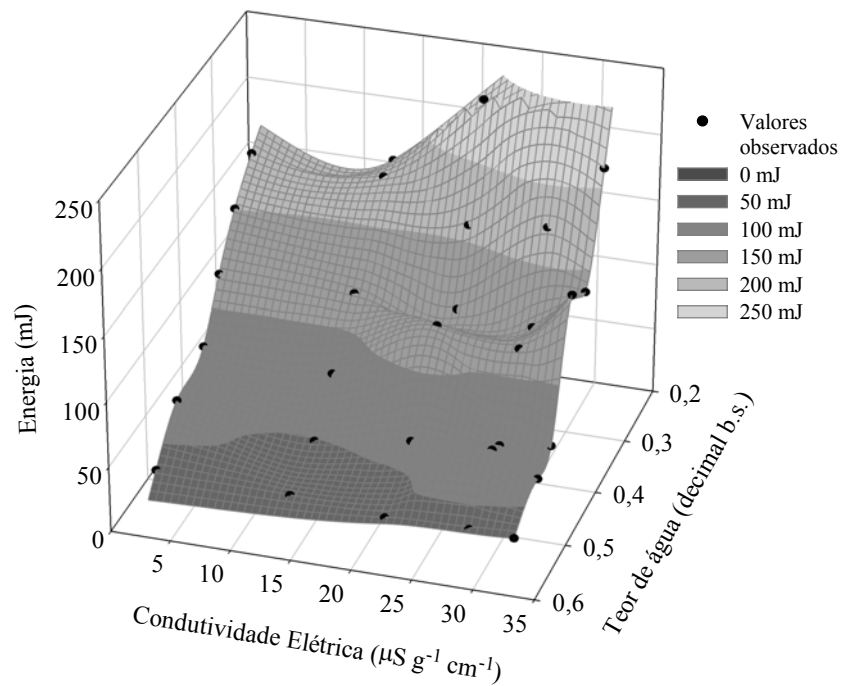


Figura 3.8: Valores médios observados da energia necessária para uma deformação específica de 0,001 m dos grãos de milho na posição natural de repouso em função do teor de água e do nível de danificação mecânica.

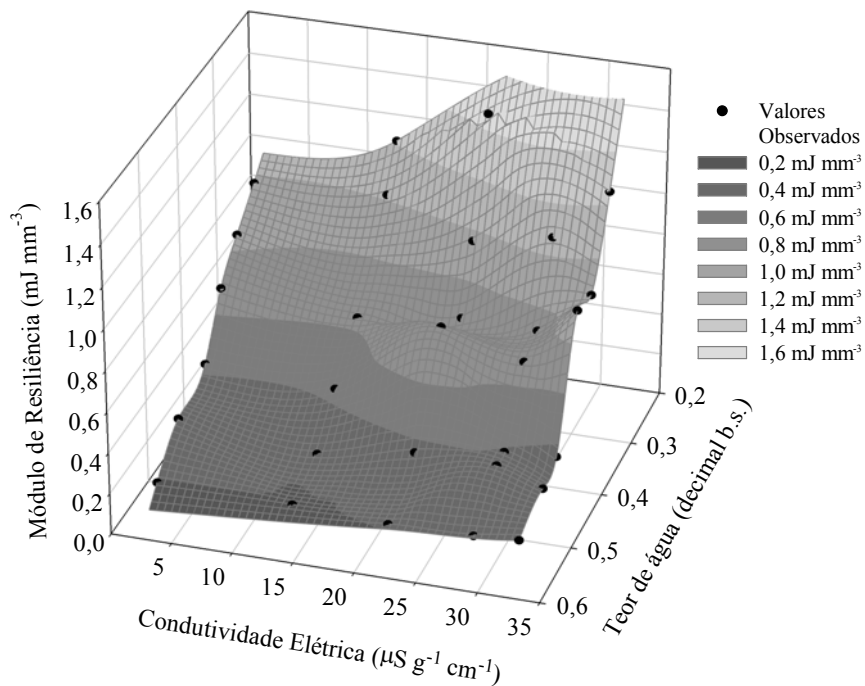


Figura 3.9: Valores médios observados do módulo de resiliência necessário para uma deformação específica de 0,001 m dos grãos de milho na posição natural de repouso em função do teor de água e do nível de danificação mecânica.

De acordo com a Figuras 3.8 e 3.9 é possível notar que os valores da energia e do módulo de resiliência referentes à deformação de 0,001 m, dos grãos de milho, variaram entre (279,32 e 36,24) mJ e (1,4687 a 0,1923) mJ mm⁻³, respectivamente, para uma faixa de água entre (0,259 e 0,588) (decimal, b.s.) e para valores de danificação mecânica, avaliados indiretamente pela condutividade elétrica, entre (2,8466 e 32,971) μS cm⁻¹ g⁻¹.

Tanto a energia quanto o módulo de resiliência específicos apresentaram comportamento semelhante ao da força e ao do módulo proporcional de deformidade, ou seja, diminuíram seus valores com o aumento do teor de água e não apresentaram variações em função do nível de danificação mecânica. Essa relação da energia e do módulo de resiliência com o teor de água não é observado quando se consideram a força e a deformação no ponto de ruptura (Güner et al., 2003; Saiedirad et al., 2008; Alatuntas e Yildiz, 2007). A maioria dos produtos agrícolas requerem uma maior força (ou energia) para uma dada deformação específica, quando se encontram com menores teores de água. No entanto, quanto menores forem os teores de água menos susceptíveis à quebra eles serão, requerendo assim maiores valores de energia para atingir o ponto de ruptura para estas condições.

A Tabela 3.2 apresenta as equações de regressão ajustadas aos valores experimentais das propriedades mecânicas analisadas para uma deformação específica de 0,001 m, em função do teor de água e do nível de danificação física dos grãos de milho, com seus respectivos valores do coeficiente de determinação.

Tabela 3.2 - Equações ajustadas aos valores experimentais da força do módulo proporcional de deformidade, da energia e do módulo de resiliência dos grãos de milho em função do teor de água e de diferentes níveis de danificação mecânica, com seus respectivos coeficientes de determinação (R²).

Equação	R ² (%)
$\hat{F}(U, \varpi) = 625,782^{**} - 821,504^{**} U + 2,097\varpi - 2,184 U\varpi$	93,10 (3.9)
$\hat{E}_p(U, \varpi) = 759,65^{**} - 1018,87^{**} U + 2,310\varpi - 1,82 U\varpi$	92,61 (3.10)
$\hat{\xi}(U, \varpi) = 288,489^{**} - 457,068^{**} U + 2,710\varpi - 4,545 U\varpi$	89,66 (3.11)
$\hat{\gamma}(U, \varpi) = 1,74416^{**} - 2,87026^{**} U + 0,01848\varpi - 0,02848 U\varpi$	90,08 (3.12)

** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste “t”.

em que:

U : teor de água, decimal, decimal b.s.;

ϖ : nível de danificação mecânica dos grãos de milho, $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$;

\hat{F} : força estimada, N;

\hat{E}_p : módulo proporcional de deformidade; MPa;

$\hat{\xi}$: energia estimada, mJ; e

$\hat{\gamma}$: módulo de resiliência estimada, mJ mm^{-3} .

Nota-se, na Tabela 3.2, que as equações que relacionam a força, o módulo proporcional de deformidade, a energia e o módulo de resiliência com teor de água e com o nível de danificação mecânica apresentaram valores satisfatórios para o coeficiente de determinação (R^2), indicando que houve boa correspondência entre os dados observados e estimados pelas equações propostas. No entanto, verifica-se também que o parâmetro das equações referente à danificação mecânica dos grãos de milho (ϖ) não foi significativo. A relação de todas as propriedades mecânicas analisadas com o teor de água pode ser descrita por meio de equações lineares. Essa linearidade apresentada implica que qualquer ganho de água pelos grãos de milho durante a embebição no processamento industrial por via úmida tem uma resposta direta no que diz respeito ao seu comportamento mecânico, para a faixa de teor de água entre (0,259 e 0,588) (decimal, b.s.), independentemente de sua integridade física. Goneli (2008) avaliou o comportamento mecânico de grãos de mamona até seu ponto de ruptura e notou que a energia e o módulo de resiliência apresentaram correlações lineares para uma faixa de teor de água entre (0,08 a 0,66) (decimal, b.s.). Já Gupta e Das (2000) verificaram que a força de ruptura, a deformação e a energia absorvida pelos grãos de girassol até o colapso podem ser descritas por relações quadráticas com o teor de água para valores entre (0,04 e 0,20) (decimal, b.s.).

A Tabela 3.3 apresenta os valores dos coeficientes elásticos do modelo proposto por Henry et al. (1996), Equação 3.1, assim como os valores da tangente e secante máximas para os grãos de milho com diferentes níveis de danificação mecânica e teores de água submetidos ao teste de compressão na posição natural de repouso.

Tabela 3.3 - Valores observados dos coeficientes elásticos d , e e f além dos valores da tangente e secante máximas obtidos a partir da curva força deformação dos grãos de milho com diferentes teores de água e níveis de danificação mecânica comprimidos na sua posição natural de repouso.

Teor de água (decimal, b.s.)	f (N mm ⁻³)	e (N mm ⁻²)	d (N mm ⁻¹)	Tangente máxima (N mm ⁻¹)	Secante máxima (N mm ⁻¹)
Produto com danificação mecânica referente a 2,847 $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$ (testemunha)					
0,29	-566,71	1019,52	-22,63	588,75	435,90
0,34	-341,60	663,83	15,24	445,24	337,74
0,38	-147,10	398,84	22,04	382,50	292,39
0,43	-75,22	357,90	-20,05	547,60	405,69
0,51	-12,41	306,95	-31,19	2499,56	1866,87
0,57	57,17	86,91	-5,33	-49,37	-38,36
Produto com danificação mecânica referente a 14,077 $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$					
0,25	-604,98	978,24	0,14	527,40	395,58
0,29	-309,14	711,68	12,87	558,99	422,46
0,33	-692,78	964,53	102,27	549,89	437,98
0,38	-255,04	622,99	-27,61	479,65	352,84
0,44	-65,87	343,08	-17,65	577,99	429,08
0,50	43,16	217,88	-34,14	-400,75	-309,10
0,57	45,57	140,94	-22,14	-167,43	-131,11
Produto com danificação mecânica referente a 22,261 $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$					
0,28	-867,78	1240,34	43,22	634,17	486,43
0,33	-537,64	1010,80	-41,56	591,90	433,54
0,36	-457,46	852,79	-60,62	469,30	336,82
0,42	-295,55	670,73	-28,21	479,18	352,33
0,50	-48,02	317,52	-30,34	669,49	494,53
0,58	57,24	106,14	-13,02	-78,62	-62,22
Produto com danificação mecânica referente a 29,194 $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$					
0,34	-527,46	854,74	21,49	483,18	367,76
0,39	-218,99	620,04	-36,16	549,03	402,73
0,43	-145,76	484,63	-9,42	527,68	393,40
0,49	-27,72	338,45	-40,87	1336,61	992,24
0,51	-13,89	304,63	-26,89	2200,34	1643,53
0,58	99,65	64,51	-7,74	-21,66	-18,18
Produto com danificação mecânica referente a 32,971 $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$					
0,31	-411,81	787,07	53,14	554,57	429,21
0,37	-418,84	752,08	-6,86	443,30	330,76
0,41	-81,42	356,57	55,82	576,34	446,21
0,47	-8,13	314,55	-40,13	4016,05	3002,01
0,51	-66,15	373,66	-53,32	650,22	474,33
0,59	59,11	134,44	-20,05	-121,97	-96,49

A descrição do modelo apresentado 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, 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. Pelos resultados apresentados na Tabela 3.3, verifica-se que essa condição foi satisfeita para todas as condições analisadas para o parâmetro e , e para o parâmetro f , essa condição só não foi satisfeita para o teor de água de 0,57 (decimal, b.s.). Desta forma, verifica-se que os dados seguem um comportamento sigmoidal, para teores de água abaixo de 0,57 (decimal, b.s.), e que estes podem ser descritos pela Equação 3.1, geralmente identificados para materiais biológicos (Henry et al., 1996). O parâmetro d se alternou entre valores positivos e negativos para todas as condições de danificação. Segundo Henry et al. (2000a), os sinais esperados para os coeficientes elásticos e e f podem não ser obtidos quando ocorrem:

- (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.

Assim, no caso deste trabalho, o fato do parâmetro de ajuste f ter apresentado valores positivos para o teor de água de 0,57 (decimal, b.s.) se justifica principalmente pela alternativa 3 apresentada, ou seja, o produto possuía um teor de água muito elevado, apesar de se saber que os grãos de milho estavam danificados.

Os valores apresentados para a tangente máxima foram superiores em relação à secante máxima, para teores de água inferiores a 0,57 (decimal, b.s.) concordando com a maioria dos trabalhos semelhantes a este (Goneli, 2008; Henry et al., 2000a; Henry et al. 2000b; Pan e Tangatanavalee, 2003; Ribeiro et al., 2007 e Corrêa et al., 2008). No entanto, esses autores relatam que a tangente e a secante máximas normalmente apresentam uma correlação inversa com o teor de água, o que não se observou neste trabalho. Além disso, os valores negativos para a tangente e secante máximas, para os teores de água mais elevados, são uma resposta direta aos valores positivos encontrados para o parâmetro f .

3.4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos sobre as propriedades mecânicas dos grãos de milho submetidos ao processo de embebição, nas condições em que foram realizados os experimentos, pode-se concluir que:

- A força, o módulo proporcional de deformidade, a energia e o módulo de resiliência referentes à deformação específica de 0,001 m dos grãos de milho na posição natural de repouso diminuíram significativamente em relação ao teor de água;
- Os valores encontrados para a força, o módulo de deformidade, a energia e o módulo de resiliência variaram, respectivamente, entre (446,10 e 144,60) N; (532,76 e 165,90) MPa; (279,32 e 36,24) mJ e entre (1,4687 e 0,1923) mJ mm⁻³, para uma faixa de teor de água entre (0,2585 e 0,5878) (decimal, b.s.);
- As alterações estruturais causadas pela danificação mecânica induzida nos grãos de milho não promoveram mudanças significativas das propriedades mecânicas analisadas durante a sua embebição; e
- O modelo sigmoidal, descrito pela Equação 3.1, descreveu satisfatoriamente os dados da relação deformação e força exibida pelos grãos de milho para teores de água inferiores a 0,57 (decimal, b.s.).

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALATUNTAŞ, E.; YILDIZ, M. Effect of moisture content on some physical and mechanical properties of faba bean (*Vicia faba* L.) grains. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 174 - 183, 2007.

ASAE STANDARDS 2001. American Society of Agricultural Engineers. Standards Engineering Practices Data, St Joseph: Michigan, 2001. 1027 p.

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**, Especial café (6), p. 42 - 53, 2003.

BOURNE, M. Food texture and Viscosity: concept and measurement. New York: Academic Press. 2002, 427 p.

BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Regras para análises de sementes**. Brasília, 1992, 365 p.

CORREA, P. C.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D. M.; JARÉN, C.; ARAZURI, S. Resistance of edible beans to compression. **Journal of Food Engineering**, v. 86, p. 172 -177, 2008.

COUTO, S. M.; 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, p. 285 - 294, 2002.

FESSEL, S. A.; VIEIRA, R. D.; CRUZ, M.C. P.; PAULA, R. C.; PANOBIANCO M.; Electrical conductivity testing of corn seeds as influenced by temperature and period of storage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41 (10), p. 1551 - 1559, 2006.

GONELI, A. L. D. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento**. 2008. 188 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

GUPTA, R. K.; DAS, S. K. Fracture resistance of sunflower seed and kernel to compressive loading. **Journal of Food Engineering**, v. 46, p. 1 - 8, 2000.

GÜNER, M.; DURSUN, E.; DURSUN, İ. G. Mechanical behaviour of hazelnut under compression loading. **Biosystems Engineering**, v.85, p. 485 - 491, 2003.

HENRY, Z.A.; SU, B.; ZHANG, H. Resistance of soya beans to compression. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.76 (2), p. 175 - 81, 2000a.

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.

HENRY, Z.A.; ZHANG, H.; ONKS, D. Generalized model of resistance to strain of cellular material. **American Society of Agricultural Engineers**, n 96-6023, St. Joseph, p. 1 - 26, 1996.

JAIN, R. K.; BAL, S. Properties of pearl millet **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 66, p. 85 - 91, 1997.

LOPES FILHO, J. F.; RAMOS, A. P.; ROMERO, J. T. Difusividade da água, dióxido de enxofre e ácido láctico em grãos de milho durante a maceração para o processo de moagem úmida. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 9 (4), p. 257 - 263, 2006.

LIU, K. Nonfermented oriental soyfoods. In Liu, K. **Soybeans chemistry, technology, and utilization**, p. 152 - 153. New York: International Thomson Publishing, 1997.

- MARABI, A.; THIEME, U.; JACOBSON, M.; SAGUY, I. S. Influence of drying method and rehydration time on sensory evaluation of rehydrated carrot particulates. **Journal of Food Engineering**, v. 72, p. 211 - 217, 2006.
- MOREIRA, R.; CHENLO, F.; CHAGURI, L.; FERNANDES, C. Water absorption, texture, and color kinetics of air-dried chestnuts during rehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 86, p. 584 - 594, 2008.
- OGUNJIMI, L. A. O.; AVIARA, N. A.; AREGBESOLA, O. A. Some engineering properties of locust bean seed. **Journal of Food Engineering**, v. 55 (2), p. 95 - 99, 2002.
- OLANIYAN, A.M.; OJE, K. Some aspects of the mechanical properties of shea nuts. **Biosystems Engineering**, v. 81, p. 413 - 420, 2002.
- OLOSO A. O.; CLARKE B. Some aspects of strength properties of cashew nuts. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 55 (1), p. 57 - 43, 1993.
- PAN, Z.; TANGRATANAVALEE, W. Characteristics of soybeans as affected by soaking conditions. **Food Science Technology**, v. 36, p. 143 - 151, 2003.
- RESENDE, O.; CORREA, P. C.; RIBEIRO, D. M.; FIGUEIREDO NETO, A. Comportamento mecânico dos grãos de feijão submetidos a compressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11 (4), p. 404 - 409, 2007.
- RIBEIRO, D. M.; CORRÊA, P. C.; FURTADO, B. F.; GONELI, A. L. D.; RESENDE, O. Propriedades mecânicas dos grãos de soja em função do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 493 - 500, 2007.
- SAIEDIRAD, M.H.; TABATABAEEFAR, A.; BORGHEI, A.; MIRSALEHI, M.; BADIL, F.; VARNAMKHASTI, M.G. Effects of moisture content, seed size, loading rate, and seed orientation on force and energy required for fracturing cumin seed (*Cuminum cyminum* Linn.) under quasi-static loading. **Journal of Food Engineering**, v. 86, p. 565 - 572, 2008.
- SOUZA, R. C. R.; ANDRADE, C. T. Investigação dos processos de gelatinização e extrusão de amido de milho. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 10 (1), p. 24 - 30, 2000.
- 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 (3), p. 768 - 772, 1982.

CONCLUSÕES GERAIS

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- As alterações estruturais causadas pela danificação mecânica induzida nos grãos de milho alteraram as taxas de absorção de água no produto, sendo que, quanto maiores os níveis de danificação, maiores foram as taxas de absorção de água;
- O modelo de Peleg se ajustou adequadamente aos dados experimentais, apresentando altos valores do coeficiente de determinação ($R^2 > 99,97\%$), baixas magnitudes do erro médio relativo e do desvio padrão da estimativa e significância dos coeficientes ($p\text{-valor} < 0,0001$), independente do nível de danificação;
- Os valores dos teores de água de equilíbrio estimados pelo modelo de Peleg praticamente não variaram com o aumento da temperatura, principalmente para grãos de milho danificados mecanicamente;
- Os valores dos coeficientes de difusão efetivos aumentaram com os aumentos da temperatura e do nível de danificação;
- A dependência do coeficiente de difusão efetivo com a temperatura pode ser descrita pelo Modelo de Arrhenius. Quanto mais íntegro fisicamente o produto,

maior o valor da energia de ativação obtido. As energias de ativação obtidas neste trabalho variaram entre (14,533 e 28,366) kJ mol⁻¹;

- As massas específicas aparente e unitária dos grãos de milho variaram numa relação quadrática com o teor de água, e a porosidade aumentou linearmente até atingir o teor de água de 0,410 (decimal b.s.), mantendo-se constante para maiores teores;
- A expansão volumétrica unitária dos grãos de milho durante a embebição ocorre de maneira desuniforme nas suas dimensões características, sendo que a maior variação ocorre no sentido da menor dimensão característica;
- A circularidade e a esfericidade dos grãos de milho não variaram com o teor de água;
- Nenhum dos modelos tradicionalmente usados para prever a variação volumétrica de produtos agrícolas se ajustou satisfatoriamente aos dados observados da expansão volumétrica aparente dos grãos de milho, sendo proposto um novo modelo que se ajustou satisfatoriamente aos dados experimentais;
- O modelo de Rahman foi o que melhor representou os dados da expansão volumétrica unitária;
- A força, o módulo proporcional de deformidade, a energia e o módulo de resiliência referentes à deformação específica de 0,001 m dos grãos de milho na posição natural de repouso diminuíram significativamente em relação ao teor de água;
- Os valores encontrados para a força, o módulo de deformidade, a energia e o módulo de resiliência variaram respectivamente entre (446,10 e 144,60) N; (532,76 e 165,90) MPa; (279,32 e 36,24) mJ e entre (1,4687 e 0,1923) mJ mm⁻³, para uma faixa de teor de água entre (0,2585 e 0,5878) (decimal, b.s.);

- As alterações estruturais causadas pela danificação mecânica induzida nos grãos de milho não promoveram mudanças significativas das propriedades mecânicas analisadas durante a sua embebição; e
- O modelo sigmoidal, descrito pela Equação 3.1, descreveu satisfatoriamente os dados da relação deformação e força exibida pelos grãos de milho para teores de água inferiores a 0,57 (decimal, b.s.).

APÊNDICE

Apêndice A

RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR DE ÁGUA DE EQUILÍBRIO PARA OS GRÃOS DE MILHO COM DIFERENTES NÍVEIS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA SUBMETIDOS AO PROCESSO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA.

Tabela 1A – Resumo da análise de variância para o teor de água de equilíbrio em função dos diferentes níveis de danificação mecânica e da temperatura de absorção de água.

Fontes de Variação	G L	Soma de quadrado	Quadrado médio	F	Significância
Danificação	4	0,07771534	0,019428840	444,30	0,00000*
Temperatura	3	0,01664203	0,005547343	126,86	0,00000*
Danificação × Temperatura	12	0,00777574	0,000647978	14,818	0,00000*
Resíduo	20	0,00087458	0,000043729		
Coeficiente de Variação (%)			0,994		

* Significativo: *p*-valor < 0,00001