

PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS GRÃOS DE SOJA EM FUNÇÃO DO TEOR DE ÁGUA

DEISE M. RIBEIRO¹, PAULO C. CORRÊA², BRUNO F. FURTADO³,
ANDRÉ L. D. GONELI⁴, OSVALDO RESENDE⁵

RESUMO: O presente trabalho teve como objetivo verificar a influência do teor de água nos valores da força máxima de compressão para uma deformação fixa (2 mm) e do módulo proporcional de deformidade de grãos de soja submetidos à compressão em diferentes posições. Foram utilizados grãos com teores de água variando de 0,58 a 0,093 (b.s.), comprimidos uniaxialmente entre duas placas paralelas, na direção de suas três dimensões principais, sob velocidade de compressão de $0,001 \text{ m s}^{-1}$. A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que a força de compressão e o módulo proporcional de deformidade diminuem com o aumento do teor de água. Além disso, os grãos de soja apresentam maior resistência à compressão quando submetidos a esforços na posição de repouso (P_1), apresentando valores semelhantes da força de compressão e do módulo proporcional de deformidade quando comprimidos nas posições P_2 (sobre o hilo) e P_3 (na vertical).

PALAVRAS-CHAVE: propriedades reológicas, módulo proporcional de deformidade, secagem.

SOYBEAN MECHANICAL PROPERTIES IN FUNCTION OF MOISTURE CONTENT

ABSTRACT: This work aimed to determine the effect of the soybean grain moisture content in the maximum compression force values for a fixed deformation (2 mm) and the proportional deformity modulus under different compression positions. Soybean grains varying from 0.58 to 0.093 (d.b.) of moisture content were compressed uniaxially between two parallel plates towards its three main dimensions under compression speed of 0.001 m s^{-1} . According to the results it was concluded that the compression force and the proportional deformity modulus decrease with the increasing of the moisture content. Also the soybean grains presented higher resistance to its compression when submitted to the repose position (P_1) and presented similar compression force and proportional deformity modulus values when compressed in the position P_2 (on the hilum) and P_3 (in the vertical).

KEYWORDS: rheological properties, proportional deformity modulus, drying.

INTRODUÇÃO

A soja é um produto com grande expressão na economia do Brasil e do mundo, não só pelo seu valor como grão para consumo, mas também pelas grandes possibilidades de utilização devido aos seus altos teores de óleo e proteína.

O conhecimento de todo o processo de produção para a obtenção de grãos com alta qualidade torna-se indispensável, uma vez que rachaduras e quebras ocorrem nos grãos se os esforços, aos quais são submetidos, excedem a força de resistência do material. Dessa forma, algumas características mecânicas têm sido estudadas para predição do comportamento dos grãos, em função da umidade e temperatura, quando submetidos a diferentes tipos de tensões (LIU et al., 1990).

¹ Eng^a Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa - MG, Fone: (0XX31) 3899-2030, deise_eng@yahoo.com.br, Bolsista Doutorado CNPq.

² Eng^a Agrônomo, Prof. Adjunto, Departamento Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa - MG.

³ Eng^a Agrícola e Ambiental, Warnell School of Forest Resources, UGA, Athens - GA, Bolsista Mestrado.

⁴ Eng^a Agrônomo, Departamento Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa - MG. Bolsista Doutorado CNPq.

⁵ Eng^a Agrícola, Departamento Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa - MG. Bolsista Doutorado CAPES.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 8-12-2005

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 14-6-2007

HENRY et al. (2000a), estudando a resistência da soja à compressão em três orientações e quatro umidades, observaram que, ao comprimir o grão, a força de ruptura, perpendicular à divisão dos cotilédones, foi maior, comparada às outras orientações, e que a habilidade da soja em resistir à compressão diminuiu com o aumento do teor de água. Além disso, os autores verificaram que maiores velocidades de compressão requerem maiores forças de ruptura e que grãos colhidos na maturidade fisiológica requerem menor força à ruptura e maior deformação, comparados àqueles colhidos cinco semanas após a maturidade fisiológica.

A partir da curva de “força-deformação”, obtida a partir do teste 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 comprimento inicial do espécime, obtém-se a curva “tensão-deformação específica”. Para grande número de materiais, o comportamento inicial da curva de “tensão-deformação 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 “força-deformação”, 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.

MAKI et al. (1994), estudando o efeito do grau de umidade nas propriedades mecânicas dos cotilédones de grãos de soja, observaram que o módulo de Young ou de elasticidade diminuiu com o aumento da umidade, com mudança abrupta para a umidade de 6,5% b.u. Entretanto, em termos de comportamento mecânico de um material, o módulo de deformidade é considerado mais significativo que o de elasticidade, pois, segundo COUTO et al. (2002), quando um produto é comprimido, a deformação total é que tem aplicação prática.

HENRY et al. (1996) relataram que a força necessária para deformar materiais biológicos, incluindo a soja, pode ser descrita como função da deformação, de acordo com a série de Taylor truncada [eq.(1)]:

$$F = ax + bx^2 + cx^3 + \dots \quad (1)$$

em que,

F - força, N;

x - deformação, mm, e

a, b, c - coeficientes elásticos do modelo com unidades de N mm^{-1} , N mm^{-2} e N mm^{-3} , respectivamente.

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

$$T = a + 2bx + 3cx^2 \quad (2)$$

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

$$S = a + bx + cx^2 \quad (3)$$

A secante máxima corresponde ao ponto em que o valor de deformação x é $-b/2c$, descrevendo a elasticidade em diferentes níveis de deformação. Os valores de deformação referentes à tangente e à secante máximas são obtidos igualando a zero, respectivamente, a derivada da tangente (dT) e da secante (dS), em função da deformação (x).

Na Figura 1, está ilustrada a curva força *versus* deformação referente à eq.(1), de acordo com HENRY et al. (1996), a qual identifica as regiões da curva força-deformação quando $b > 0$ e $c < 0$. O primeiro termo (ax) da eq.(1), um componente linear, representa a contribuição elástica e

simplesmente controla a primeira região da curva (origem ao ponto 1). O segundo termo (bx^2) é um componente parabólico e controla simplesmente a segunda região (pontos 1-3), que inclui o ponto de inflexão e é, algumas vezes, referido como a parte reta da curva. O terceiro termo, para um valor negativo de c , corresponde a uma parte cúbica, que é negativa quando x é positivo.

HENRY et al. (2000a) aplicaram o modelo citado para estudar a resistência à compressão de nove variedades de soja, colhidas em duas diferentes épocas. Observaram que os módulos de tangente e secante máximos diminuíram com o aumento da umidade.

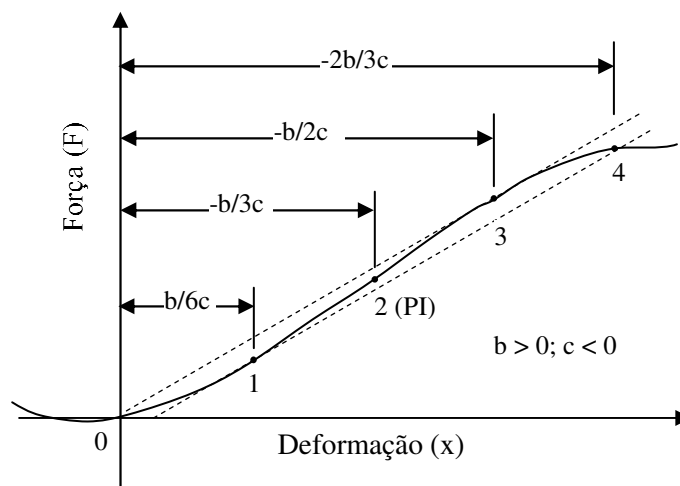


FIGURA 1. Ilustração da curva força vs deformação do modelo $F = ax + bx^2 + cx^3$; para $b > 0$ e $c < 0$; primeira região inclui a curva da origem até o ponto 1; segunda região inclui a curva dos pontos 1 a 3; terceira região inclui o ponto 3 até o final do teste; PI = ponto de inflexão (HENRY et al., 1996).

Na Figura 2, estão apresentadas as curvas de força-deformação comuns para alimentos (BOURNE, 2002). A maioria dos produtos apresenta comportamento semelhante à curva A, que é côncava em relação ao eixo y . Essa curva é típica de produtos, tais como *marshmallows*, frutos e vegetais maduros. A curva B descreve o comportamento de produtos rígidos, tais como frutos, vegetais verdes e ovos. Esses 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 e outros alimentos porosos.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo verificar a influência do teor de água nos valores das variáveis que caracterizam a textura de grãos de soja submetidos à compressão em diferentes posições: força máxima de compressão para deformação fixa; módulo proporcional de deformidade; tangente e secante máximas.

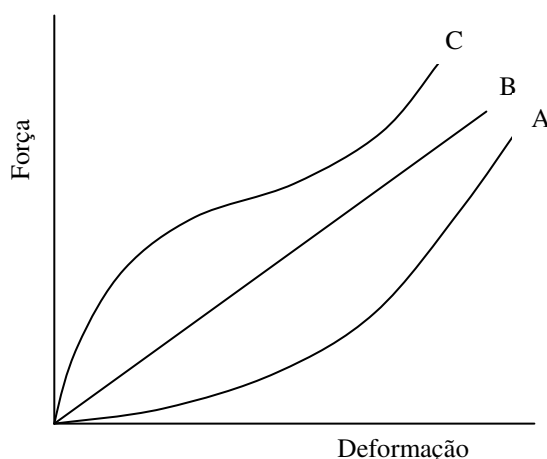


FIGURA 2. Três curvas típicas do comportamento força-deformação para alimentos (BOURNE, 2002).

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas pertencente ao CENTREINAR, localizado na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG.

Foram utilizados grãos de soja, variedade UFV 20, proveniente de Florestal - MG. Os grãos foram colhidos com aproximadamente 0,65 (b.s.) de umidade, e posteriormente secos em câmaras do tipo B.O.D., à temperatura de 35 °C e umidade relativa de 36%. Os teores de água do produto utilizado no experimento variaram entre 0,58 e 0,093 (b.s.) e foram determinados pelo método da estufa, 105 ± 1 °C, durante 24 h, em três repetições. Ao término de cada tratamento de secagem, as amostras foram homogeneizadas e encaminhadas para determinação das propriedades mecânicas, à temperatura controlada de 22 °C.

Os ensaios experimentais de compressão nos grãos, testados individualmente, foram realizados em máquina de ensaio universal de teste, modelo *TA Hdi Texture Analyser*, utilizando célula de carga de 500 N. Os grãos foram submetidos à compressão uniaxial, entre duas placas paralelas, aplicada em suas três dimensões principais, espessura (P_1), largura (P_2) e comprimento (P_3), à velocidade de compressão de 0,001 m s⁻¹ (Figura 3). Para cada uma das posições, foram utilizados 15 grãos de soja. A finalização de cada ensaio de compressão ocorreu quando a deformação de 2 mm foi atingida.

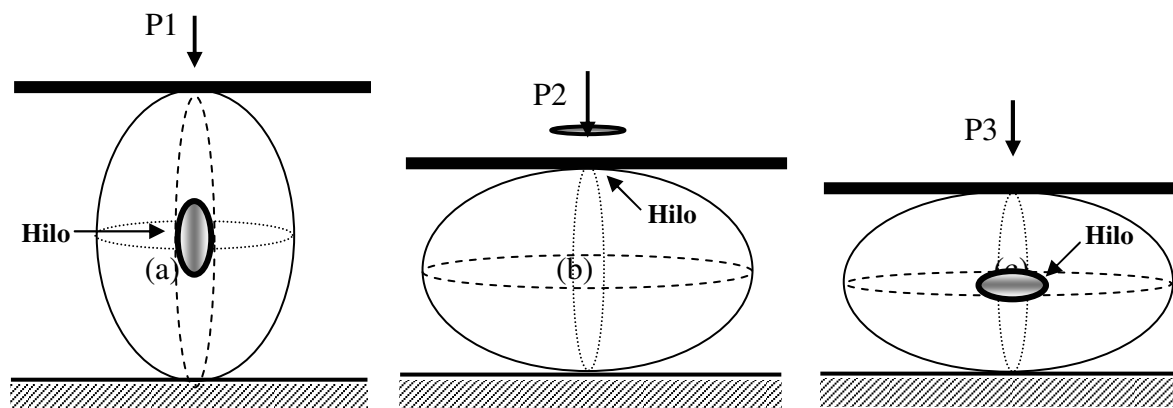


FIGURA 3. Orientações dos grãos de soja durante os ensaios de compressão. (a) posição P_1 ; (b) posição P_2 , e (c) posição P_3 .

Devido à ausência do coeficiente de Poisson para grãos de soja, foi obtido, a partir da curva força-deformação, o módulo proporcional de elasticidade do produto (E_p), de acordo com COUTO et al. (2002), a partir da eq.(4), para corpos convexos.

$$E_p = \frac{E}{(1-\nu^2)} = \frac{0,531 F}{D^{3/2}} \left[2 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (4)$$

em que,

E_p - módulo proporcional de elasticidade, Pa;

E - módulo de elasticidade, Pa;

F - força de compressão, N;

ν - coeficiente de Poisson, variável de 0,2 a 0,5 para produtos agrícolas;

D - deformação total (soma da elástica e plástica), m, e

r_1 e R_1 - raios de curvatura do corpo nos pontos de contato, m.

Os valores dos raios de curvatura (r e R) dos grãos, nos pontos de contato, para cada posição e teor de água, foram obtidos por meio de ajustes de circunferências às curvaturas do corpo, segundo os planos coordenados relevantes a cada posição de compressão, de acordo com COUTO

et al. (2002): P_1 - força aplicada com o hilo na horizontal (posição de repouso); P_2 - força aplicada sobre o hilo; P_3 - força aplicada com o hilo na posição vertical (Figuras 3 e 4). Os dados da força máxima de compressão e do módulo proporcional de elasticidade da soja foram plotados em função do teor de água e da posição de compressão dos grãos.

Aos dados de força e deformação para teor de água, foi ajustada a eq.(1) para a obtenção dos coeficientes de elasticidade. A partir da equação ajustada, foram obtidos os módulos de tangente e de secante máximas.

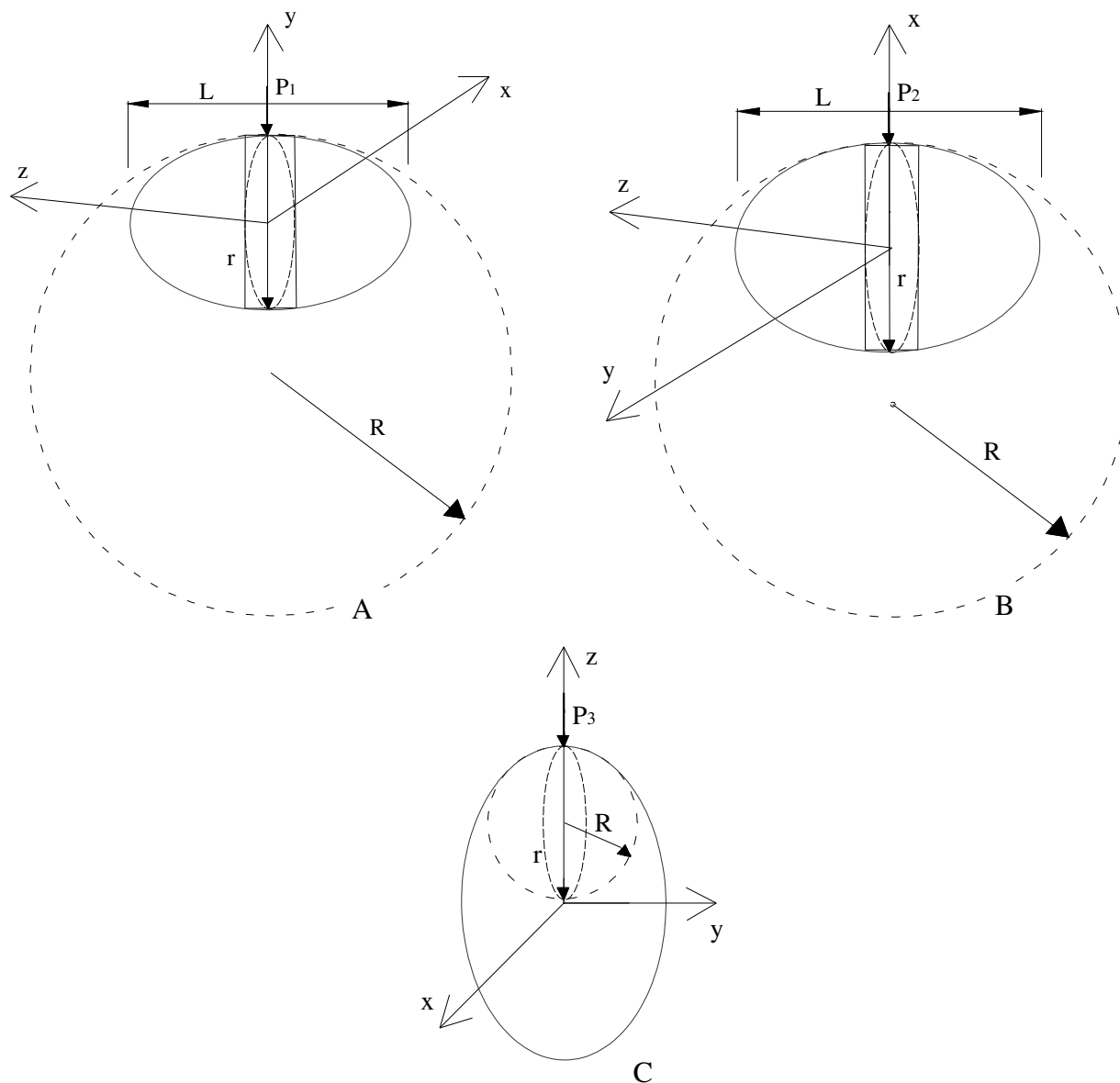


FIGURA 4. Raios de curvatura do grão de soja na região de contato “produto-placa compressora”, usados na determinação dos “módulos proporcionais de deformidade”. (A) compressão na posição P_1 ; (B) compressão na posição P_2 , e (C) compressão na posição P_3 .

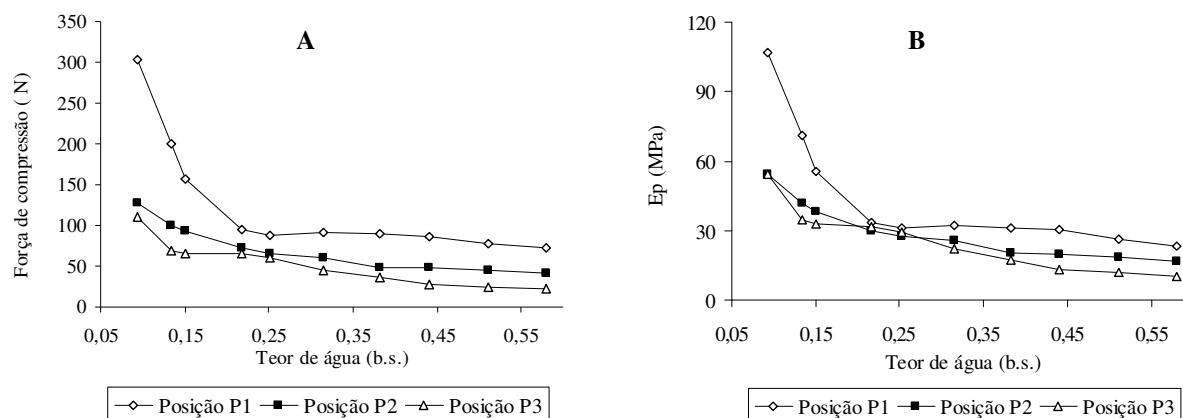
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1, estão apresentados os valores médios dos raios de curvatura dos grãos de soja para cada posição e teor de água, utilizados nos cálculos para a determinação do módulo proporcional de elasticidade.

Na Figura 5, encontram-se os valores médios das forças máximas de compressão e dos módulos proporcionais de elasticidade em função do teor de água e da posição de compressão para a deformação de 2 mm.

TABELA 1. Valores médios dos raios de curvatura dos grãos de soja para cada posição e teor de água.

Teor de Água (b.s.)	Posição					
	P ₁		P ₂		P ₃	
	r (m)	R (m)	r (m)	R (m)	r (m)	R (m)
0,580	0,00453	0,00725	0,00242	0,00559	0,00205	0,00340
0,511	0,00391	0,00608	0,00233	0,00513	0,00191	0,00275
0,440	0,00380	0,00575	0,00237	0,00511	0,00195	0,00290
0,383	0,00378	0,00605	0,00245	0,00485	0,00199	0,00291
0,315	0,00380	0,00564	0,00231	0,00492	0,00199	0,00286
0,252	0,00371	0,00549	0,00237	0,00475	0,00208	0,00292
0,217	0,00376	0,00578	0,00239	0,00493	0,00203	0,00295
0,168	0,00376	0,00560	0,00244	0,00491	0,00197	0,00286
0,135	0,00369	0,00566	0,00243	0,00481	0,00195	0,00284
0,093	0,00377	0,00564	0,00235	0,00467	0,00203	0,00280

FIGURA 5. Valores médios da força máxima de compressão (A) e do módulo proporcional de elasticidade - E_p (B) de grãos de soja em função do teor de água para diferentes posições de compressão.

Verifica-se que a força de compressão necessária para deformar o grão em 2 mm diminuiu com o aumento do teor de água, concordando com HENRY et al. (2000a). Para a posição P₁, a força média variou entre 302,72 e 72,5 N; para a posição P₂, 127,64 e 41,19 N, e para a posição P₃, variou entre 110,86 e 21,72 N, em função do teor de água. Assim, para teores de água mais elevados, o grão oferece pequena resistência à compressão, aumentando proporcionalmente com a redução da umidade. Essa tendência deve-se, provavelmente, à mudança gradual na integridade da matriz celular com a redução do teor de água (GUPTA & DAS, 2000). Observam-se, ainda, diferenças entre as posições dos grãos, sendo os maiores valores da força de compressão observados para a posição P₁. Esse fato deve-se, provavelmente, ao surgimento de tensões cisalhantes nos tecidos internos que, dependendo da direção do esforço aplicado, deverá ser requerida maior ou menor força para deformar o grão. Essas deformações causam ruptura dos cotilédones que apresentavam, inicialmente, acomodação celular definida (PETERSON et al., 1995). A partir dos dados de força de compressão, foram obtidos os módulos proporcionais de deformidade, os quais apresentaram o mesmo comportamento da força de compressão em função do teor de água.

Os valores do módulo proporcional de elasticidade variaram entre 23,1 e 106,9 MPa para P₁; 16,8 e 54,2 MPa para P₂, e 10,2 e 54,3 MPa para P₃, com a redução da umidade. Verifica-se que a força de compressão e o módulo proporcional de elasticidade tornam-se aproximadamente constantes para valores de umidade superiores a 0,22 (b.s.). BILANSKI (1987) observou esse

comportamento para valores de umidade acima de 0,15 (b.s.). Observa-se, ainda, que o comportamento dos grãos, quando comprimidos nas posições P₂ e P₃, foi semelhante, apresentando pequenas diferenças tanto para os valores de força de compressão como para os valores do módulo proporcional de elasticidade.

Os valores dos coeficientes elásticos a , b e c , para a posição P₁, aumentaram com a redução do teor de água (Tabela 2), como observado por HENRY et al. (2000b).

TABELA 2. Valores dos coeficientes elásticos a , b e c , para cada teor de água dos grãos de soja, comprimidos na posição P₁.

Teor de Água (b.s.)	a (N mm ⁻¹)	b (N mm ⁻²)	c (N mm ⁻³)
0,315	45,321	-32,481	18,944
0,252	58,885	-53,465	25,725
0,217	67,769	-54,762	24,429
0,168	124,720	-78,937	30,604
0,135	172,971	-96,754	32,237
0,093	367,778	-272,087	88,870

Segundo HENRY et al. (1996), a descrição do modelo mostra que os sinais dos coeficientes b e c identificam condições especiais do material e do teste. Para espécies não-danificadas, no entanto, o sinal esperado para os coeficientes deverá ser positivo para b e negativo para c . Além disso, valor positivo de a é sempre requerido para inclinação inicial positiva da curva. Dessa forma, observa-se que, embora os valores apresentem coerência numérica, existe indicativo de problemas do material ou do teste, uma vez que o sinal de b foi negativo e o de c , positivo. Possivelmente, esse fato ocorreu devido a efeitos como: (1) deslizamento do grão entre as placas de compressão; (2) grãos apresentando danos físicos não-detectáveis a olho nu; (3) grãos apresentando umidade elevada, dificultando, assim, a detecção do ponto de ruptura devido a sua maciez (HENRY et al., 2000a).

Contudo, no presente trabalho, as curvas obtidas de força *versus* deformação para cada teor de água estão coerentes com aquelas citadas por BOURNE (2002). Esse fato pode indicar a necessidade da condução de experimentos mais aprofundados sobre o modelo proposto por HENRY et al. (1996) para estudo da elasticidade de produtos biológicos.

Embora os valores dos coeficientes do modelo proposto por HENRY et al. (1996) não tenham seguido o critério desses autores, foram calculados os valores de tangente e secante máximas para a posição P₁ e para diferentes umidades (Tabela 3).

TABELA 3. Valores da tangente e secante máximas da curva força x deformação dos grãos de soja, comprimidos na posição P₁, para cada teor de água.

Teor de Água (b.s.)	Tangente Máxima (N mm ⁻¹)	Secante Máxima (N mm ⁻¹)
0,315	45,321	37,586
0,252	58,885	43,452
0,217	67,769	50,720
0,168	124,720	96,442
0,135	172,971	132,639
0,093	367,778	252,080

Devido às diferenças entre os sinais encontrados no presente trabalho e aqueles citados por HENRY et al. (1996), para os coeficientes b e c , a tangente e secante máximas foram obtidas para $x = -2b/3c$ e $x = -b/6c$, respectivamente. Observa-se aumento nos valores de tangente e secante máximas com a redução da umidade; além disso, notam-se maiores valores da tangente máxima em relação aos da secante para o mesmo teor de água, concordando com HENRY et al. (2000a), PAN & TANGRATANAVALEE (2003) e HENRY et al. (2000b).

CONCLUSÕES

O teor de água afeta significativamente as propriedades mecânicas dos grãos de soja, promovendo, com a redução do teor de água, aumento dos valores da força máxima de compressão e do módulo proporcional de elasticidade. Com a redução do teor de água de 0,58 para 0,093 (b.s.), a força máxima de compressão, para deformação fixa de 2 mm, variou entre 302,72 e 72,5 N para a posição de repouso (P₁); 127,64 e 41,19 N para a posição P₂ (sobre o hilo), e para a posição P₃ (hilo na posição vertical) variou entre 110,86 e 21,72 N. Os valores do módulo proporcional de elasticidade variaram entre 23,1 e 106,9 MPa para P₁; 16,8 e 54,2 MPa para P₂, e 10,2 e 54,3 MPa para P₃, considerando a mesma faixa de teor de água. Além disso, concluiu-se que os grãos de soja apresentam maior resistência à compressão quando submetidos a esforços na posição P₁, apresentando valores semelhantes da força de compressão e do módulo proporcional de elasticidade quando comprimidos nas posições P₂ e P₃.

REFERÊNCIAS

- BILANSKI, W. Mechanical properties of soybeans. In: REZNICEK, R. (Ed.) *Physical Properties of Agricultural Materials and Products*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1987. p.363-8.
- BOURNE, M. *Food texture and viscosity: concept and measurement*. New York: Academic Press, 2002. 427 p.
- COUTO, S.A.; BATISTA, C.S.; PEIXOTO, A.B.; DEVILLA, I.A. Comportamento mecânico de frutos de café: módulo de deformidade. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.6, n.2, p. 285-94, 2002.
- GUPTA, R.K.; DAS, S.K. Fracture resistance of sunflower seed and kernel to compressive loading. *Journal of Food Engineering*, Dublin, v.46, n.2, p.1-8, 2000.
- HENRY, Z.A.; ZHANG, H.; ONKS, D. *Generalized model of resistance to strain of cellular material*. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1996. p.1-26 (Paper N° 96-6023).
- HENRY, Z.A.; SU, B.; ZHANG, H. Resistance of soya beans to compression. *Journal of Agricultural Engineering Research*, London, v.76, n.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*, London, v.76, n.2, p.101-10, 2000b.
- LIU, M.; HAGHIGHI, K.; STROSHINE, R.L.; TING, E.C. Mechanical properties of soybean cotyledon and failure strength of soybean kernel. *Transactions of the ASAE*, St Joseph, v.33, n.2, p.559-65, 1990.
- MAKI, K.; BARTSCH, J.; PITT, R.; LEOPOLD, A.C. Viscoelastic properties and the glassy state in soybeans. *Seed Science Research*, Wallingford, v.4, n.1, p.27-31, 1994.
- PAN, Z.; TANGRATANAVALEE, W. Characteristics of soybeans as affected by soaking conditions. *Lebensm.-Wiss. U.-Technol*, London, v.36, n.1, p.143-51, 2003.
- PETERSON, J.M.; PERDOMO, J.A.; BURRIS, J.S. Influence of kernel position, mechanical damage and controlled deterioration estimates on hybrid maize seed quality. *Seed Science and Technology*, Zurich, v.23, n.3, p.647-57, 1995.