

## MÓDULOS DE DEFORMIDADE DE FRUTOS DE CAFÉ EM FUNÇÃO DO ESTÁDIO DE MATURAÇÃO DO PRODUTO E DE SUA ORIENTAÇÃO DURANTE A COMPRESSÃO

S. RUFFATO<sup>1</sup>; COUTO, S.M.<sup>2</sup>; BATISTA, C.S.<sup>3</sup> e PEIXOTO, A.B.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Eng.<sup>a</sup>-Agrícola, Doutoranda, Depto. de Engenharia Agrícola, UFV, CEP 36571-000 Viçosa-MG; Fone (31) 3899 1924 – Fax (31) 3899 2735, <sruffato@alunos.ufv.br>; <sup>2</sup> Ph.D., Prof. Adjunto, Depto. de Engenharia Agrícola, UFV, <scouto@mail.ufv.br>; <sup>3</sup> Eng.<sup>a</sup>-Agrícola, Mestranda, Depto. de Engenharia Agrícola, UFV, <cbatista@buynet.com.br>; <sup>4</sup> Estudante de Engenharia de Alimentos, UFV, <abraao@bahia.net>

**RESUMO:** Módulos de deformidade de frutos de café em diferentes estádios de maturação identificados pela coloração “verde”, “verdoengo” e “cereja” foram determinados. Os módulos foram obtidos para o produto comprimido segundo três orientações. A orientação do fruto de café durante a compressão parece afetar muito pouco os valores dos módulos de deformidade do produto “verde”; entretanto, para frutos nos outros estádios de maturação, a posição de compressão é um parâmetro relevante. Para todas as posições de compressão, os valores do módulo dos frutos “verde” foram superiores aos dos frutos “cereja” e aos do produto “verdoengo”. Os módulos dos frutos “cereja” sempre foram menores do que os do “verdoengo”.

**Palavras-chave:** café, compressão, comportamento mecânico.

### MODULUS OF DEFORMABILITY OF COFFEE FRUITS AS A FUNCTION OF PRODUCT MATURATION LEVEL AND ITS ORIENTATION DURING COMPRESSION

**ABSTRACT:** Values for modulus of deformability of coffee fruits at different maturation levels, named by their coloration as “green”, “verdoengo” and “cherry”, were determined in this work. The modulus values were obtained for the product compressed at three orientations. The coffee fruit orientation during the compression seems to affect very little the deformability modulus values of the “green” product, however, for fruits in the other maturation levels, the position is an important parameter. For all compression positions, the modulus values of the “green” fruit were higher than those for “cherry” and “verdoengo” fruits. The modulus values of the “cherry” fruits were always smaller than those for the “verdoengo”.

**Key Words:** coffee; compression; mechanical behavior.

## INTRODUÇÃO

O comportamento mecânico de um material é importante, principalmente, na especificação de cargas que este pode suportar de maneira segura ou de cargas que determinados membros de máquinas deverão exercer sobre o produto para se obter um resultado específico. Entretanto, corpos se deformam de maneira diferenciada quando submetidos a um mesmo carregamento. O que distingue um corpo do outro é a relação entre força e deformação, denominada equação constitutiva do material. A mais simples equação constitutiva é aquela em que a deformação é diretamente proporcional à força. Na caracterização da resposta do material, os dados de força-deformação, provenientes de testes uniaxiais (compressão ou tração), são expressos em termos de quantidades que independem do tamanho do espécime; a força é dividida pela área da seção transversal, resultando em valores de tensão axial, e a deformação é dividida pelo comprimento inicial do espécime, para se obter a deformação específica axial. Para grande número de materiais, o comportamento inicial da curva de “tensão-deformação específica” é linear; a inclinação da reta (módulo de elasticidade) é única para cada material e é uma medida da sua dureza. Em termos de comportamento mecânico de produtos agrícolas, muitos pesquisadores têm empregado os procedimentos e testes usados para materiais não-biológicos. Espécimes cilíndricos, retirados de materiais biológicos, foram submetidos a testes de compressão uniaxial, entre placas paralelas, para determinação do módulo de elasticidade dos seguintes produtos: maçã (MOHSENIN et al., 1963), batata (FINNEY et al., 1964), queijo e manteiga (DAVIS, 1937). ZOERB e HALL (1960) e SHELEF e MOHSENIN (1966) determinaram o módulo de elasticidade de grãos agrícolas usando espécimes preparadas ao se cortarem as extremidades do produto.

Visto a importância do estudo sobre o comportamento mecânico de produtos biológicos, este trabalho teve por objetivo a determinação do módulo de deformidade de frutos de café em função do grau de maturação dos frutos e da posição do produto durante a compressão.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliação do comportamento mecânico de materiais biológicos, trabalhou-se com frutos de café, variedade Catuaí Vermelho. Os frutos usados neste experimento encontravam-se em três estádios de maturação: “cereja”, a  $69,9 \pm 0,4\%$  b.u.; “verdoengo”, a  $75,7 \pm 0,9\%$  b.u.; e “verde”, a  $72,0 \pm 0,8\%$  b.u. Em cada teste foram comprimidos, entre duas placas paralelas, 50 frutos, a uma velocidade de  $5 \text{ mm min}^{-1}$ , segundo cada uma das três posições - P1, P2 e P3 -, como esquematizado na Figura 1, em que o fruto, na sua posição de maior estabilidade, se apóia em uma placa rígida.

O módulo de elasticidade aparente (E) pode ser determinado por meio da equação (AGRICULTURAL ENGINEERS YEARBOOK OF STANDARDS, 1994):

$$E = \frac{0,531F(1-\mu^2)}{D^{3/2}} \left[ \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{1/3} + \left( \frac{1}{r_2} + \frac{1}{R_2} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (1)$$

em que

F – força (N);

D – deformação elástica do corpo em ambos os pontos de contato - com a placa superior e com a inferior - (m);

$\mu$  – razão de Poisson; e,

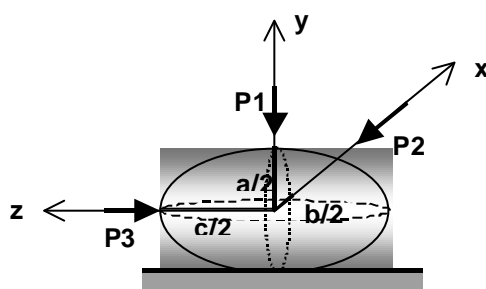
$r_1, R_1, r_2$  e  $R_2$  – raios de curvatura do corpo convexo nos pontos de contato (m).

É válido ressaltar que o fruto de café, nas situações investigadas, foi considerado como um corpo convexo. Os dados de “força-deformação”, provenientes dos testes de compressão do material, podem ser usados, com o método proposto por Hertz em 1896. Para se determinar o módulo de elasticidade pela equação 1, faz-se necessária a separação da deformação total do produto em suas partes elástica e plástica. Isso requer a obtenção da curva de “força versus deformação” durante o carregamento e descarregamento do produto. Um módulo de deformidade do produto pode ser obtido, também, pela equação 1, só que, neste caso, D representa a deformação total (soma da elástica e plástica) e requer, apenas, a curva de “força versus deformação” durante o carregamento do produto. Em termos de comportamento mecânico de um material, o módulo de deformidade é tido como mais significativo do que o de elasticidade, pois, quando um produto é comprimido, a deformação total é que tem aplicação prática.

Para obtenção das curvas de compressão do produto (força versus deformação), frutos intactos foram submetidos a testes de compressão uniaxial em uma máquina de ensaios universal (EMIC), utilizando-se uma célula de carga de 100 kgf. Das curvas de compressão foram obtidos os valores das forças necessárias para produzir nos frutos deformações específicas iguais a 1,0; 2,5; 3,5; e 5,0%. Para determinação do módulo de deformidade, em cada situação investigada, considerou-se a existência de planos de simetria nos frutos de café. Dessa forma, os raios de curvatura do produto em contato com a placa superior foram considerados iguais àqueles do material em contato com a placa inferior. O módulo de deformidade depende da razão de Poisson, que pode ser considerada uma constante para cada material, cujo valor é desconhecido para frutos de café. Assim, resolveu-se criar uma nova variável, E', que fosse proporcional ao módulo de deformidade, definida como:

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

Os dados provenientes das curvas de compressão “força-deformação específica” foram transformados em “força-deformação” e foram usados na equação 2 para a obtenção de “módulos proporcionais de deformidade”. Os valores dos raios de curvatura ( $r_1$  e  $R_1$ ) do corpo nos pontos de contato, para cada posição de compressão, foram obtidos por meio de ajustes de circunferências às curvaturas do corpo, segundo os planos coordenados relevantes a cada posição de compressão. O fruto de café foi considerado um elipsóide com dimensões principais iguais aos valores médios das dimensões, determinados experimentalmente, para cada eixo de compressão. As variações nos valores dos módulos de deformidade foram determinadas em função do (a) grau de maturação dos frutos e (b) local de aplicação, no produto, das forças de compressão.



**Figura 1** - Esquema das posições de compressão de um fruto de café.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

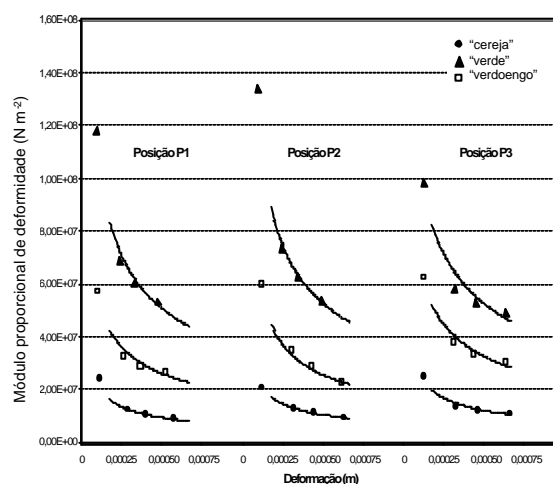
Para obtenção do “módulo proporcional de deformidade” usando a equação 2 é essencial a determinação da curva de “força versus deformação” para o produto e dos raios de curvatura do fruto. Na obtenção dos raios de curvatura foram usados os valores médios das dimensões a, b e c (Figura 1) de 150 frutos em cada estágio de maturação. Os valores dos raios de curvatura ( $r_1$  e  $R_1$ ) do corpo nos pontos de contato, para cada posição de compressão, são apresentados no Quadro 1.

Curvas de equações dos modelos potenciais, ajustadas (regressão) aos dados do módulo proporcional de deformidade versus deformação, para cada posição de compressão e estágio de maturação do fruto e os módulos “experimentais” podem ser visualizados na Figura 2. Observa-se, pela Figura 2, que existe tendência de os valores do módulo diminuírem com o aumento de deformação do fruto e nota-se,

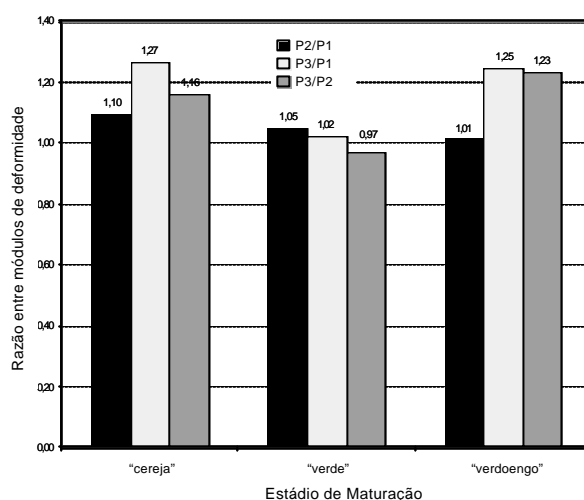
também, que os valores dos módulos de deformidade para frutos “verde” foram os maiores, enquanto aqueles para o produto “cereja” foram os menores. A Figura 3 mostra, para frutos em cada estágio de maturação, a razão entre os valores do módulo proporcional de deformidade obtido para o produto comprimido nas posições P2 e P3 e aquele obtido para o fruto comprimido na posição P1. Nesta figura encontra-se, também, a razão entre os módulos de frutos comprimidos nas posições P3 e P2. Observa-se que, para os frutos “verde”, a posição de compressão do produto parece afetar muito pouco os valores dos módulos de deformidade. Entretanto, para frutos nos outros estágios de maturação, a posição de compressão é um parâmetro relevante. Para frutos “cereja” e “verdoengo”, os maiores módulos foram para o produto comprimido na posição P3, e os menores, para aqueles comprimidos na P1.

**Quadro 1** - Raios de curvatura (mm) dos frutos de café em diferentes graus de maturação durante compressão nas três posições

Grau de maturação do fruto	Posição de compressão					
	P1		P2		P3	
	Plano cartesiano					
	yz ( $r_1$ )	yx ( $R_1$ )	xy ( $r_1$ )	xz ( $R_1$ )	zy ( $r_1$ )	zx ( $R_1$ )
“cereja”	7,3	6,7	5,6	7,1	5,6	6,3
“verde”	7,8	5,0	4,7	7,6	4,0	4,4
“verdoengo”	8,4	6,7	4,9	7,3	4,6	5,9



**Figura 2** - Valores determinados para os módulos proporcionais de deformidade,  $E'$ , de frutos, em diferentes estágios de maturação e comprimidos em diferentes posições, em função das deformações.



**Figura 3** - Razão entre os valores dos módulos proporcionais de deformidade obtidos para o produto comprimido nas diferentes posições de compressão.

## CONCLUSÃO

O módulo proporcional de deformidade é dependente do valor da deformação do fruto; quanto maior for a deformação, menor será o valor do módulo. A posição de compressão dos frutos de café parece afetar muito pouco os valores dos módulos de deformidade do produto "verde"; entretanto, para frutos nos outros estádios de maturação, a posição de compressão é um parâmetro relevante. Para frutos "cereja" e "verdoengo", os maiores módulos foram para o produto comprimido na posição P3 e os menores para aqueles comprimidos na P1. Para todas as posições de compressão, os valores do módulo do fruto "verde" foram superiores aos dos frutos "cereja" e aos do produto "verdoengo". Os módulos dos frutos "cereja" sempre foram menores do que os do "verdoengo". Os módulos proporcionais de deformidade para frutos "cereja" variaram de  $(9 \pm 1) \times 10^6$  até  $(1,5 \pm 0,2) \times 10^7$  N m<sup>-2</sup>; os dos frutos "verde" variaram de  $(5,10 \pm 0,09) \times 10^7$  até  $(6,8 \pm 0,2) \times 10^7$  N m<sup>-2</sup>; e os módulos proporcionais de deformidade para frutos "verdoengo" variaram de  $(2,6 \pm 0,4) \times 10^7$  até  $(4,0 \pm 0,4) \times 10^7$  N m<sup>-2</sup>.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRICULTURAL ENGINEERS YEARBOOK OF STANDARDS. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, 1994.

DAVIS, J.G. The rheology of cheese, butter and other milk products. **Journal of Dairy Research**, v.8, p.245. 1937.

FINNEY, E.E.; HALL, C.W.; MASE, G.E. Theory of linear viscoelasticity applied to potato. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.9, n.4, p.307-312. 1964.

HERTZ, H. Miscellaneous Papers. MacMillan and Company, New York. 1896.

MOHSENIN, N.; COOPER, H.E.; TUKEY, L.D. Engineering approach to evaluation of textural factors in fruits and vegetables. Transactions of the ASAE, v.6, n.2, p.85-88, 92. 1963.

SEGERLIND, L.G. **Applied finite element analysis**. 2. ed. New York: John Wiley and Sons, 1984. 427p.

SHELEF, L.; MOHSENIN, N.N. Moisture relations in germ-endosperm and whole corn kernel. **Cereal Chemistry**, v.43, n.3, p.347-353. 1966.

ZOERB, G.C.; HALL, C.W. Some mechanical and rheological properties of grains. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.5, n.1, p.83-92. 1960.