



Comportamento mecânico de frutos de café: módulo de deformidade¹



Sandra M. Couto², Claudia da S. Batista³, Abraão B. Peixoto⁴ & Ivano A. Devilla⁵

¹ Trabalho financiado pelo Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Café - CBP&D Café

² DEA/UFV. Av. Ph Rolfs, s/n, CEP 36571-000, Viçosa, MG. Fone: (31) 3899-1927. E-mail: scouto@mail.ufv.br (Foto)

³ DEA/UFV. E-mail: csbatista@terra.com.br

⁴ DTA/UFV. E-mail: abraao@bahia.net.br

⁵ DEA/UFV. E-mail: devilla@alunos.ufv.br

Protocolo 013 - 6/2/2001

Resumo: Determinaram-se, neste trabalho, os módulos de deformidade de frutos de café em diferentes estádios de maturação, identificados pela coloração “verde”, “verdoengo” e “cereja”, obtidos para o produto comprimido em diferentes velocidades, segundo três orientações. A velocidade de compressão tem influência nos valores dos módulos dos frutos, a variação do valor do módulo do fruto com a velocidade de compressão é diferenciada de acordo com o estágio de maturação do produto e 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 de deformidade do fruto “verde” foram superiores aos dos frutos “cereja” e aos do produto “verdoengo”; enfim, os módulos dos frutos “cereja” sempre foram menores que os do “verdoengo”.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L., deformidade, elasticidade

Mechanical behavior of coffee fruits: Modulus of deformity

Abstract: Values for modulus of deformity of coffee fruit at different maturity stages, named by their coloration as “green”, “verdoengo” and “cherry”, were determined in this work. The values were obtained for the product compressed along three different directions and submitted to different compression speeds. The speed influenced the value of the fruit modulus. The variation of the value of the fruit modulus with the compression speed was differentiated according to the stage of maturity. The fruit orientation during the compression seems to have very little effect on the deformity modulus of the “green” product, however, for the fruits in the other maturity stages. The compression position was 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: *Coffea arabica* L, deformity, elasticity

INTRODUÇÃO

Desde a colheita até o destino final, o café é submetido a vários processos que envolvem uma série de tratamentos mecânicos. O comportamento mecânico de um material é importante, principalmente na especificação de cargas que ele pode suportar de maneira segura, ou de cargas que determinadas máquinas deverão exercer sobre o produto, para se obter um resultado específico.

Segundo Segerlind (1984) o conhecimento das propriedades mecânicas básicas é um requerimento para simulações e

cálculos para predição do comportamento de um material, quando submetido a diferentes tipos de carregamento. Dentre essas propriedades evidencia-se o módulo de elasticidade do material, enquanto o conhecimento deste módulo permite que sejam feitas comparações de resistência relativa de vários materiais.

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. O experimento mais simples e comum para se medir a resposta mecânica de um material é o teste de compressão (ou tração) uniaxial, através do qual uma força, gradualmente crescente, é aplicada (pela placa compressora) no material, enquanto os dados de força-deformação são registrados durante a compressão. Se o material é não-biológico, geralmente um espécime de forma geométrica regular, retirado do material, é submetido aos testes. Os valores de força e deformação dependem do tamanho do espécime, pois quanto maior o seu tamanho, maior a força para produzir a mesma deformação. Na caracterização da resposta do material, os dados de força-deformação 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. A curva de “força-deformação” para um material transformase, então, em uma de “tensão-deformação específica”.

Para um grande número de materiais, o comportamento inicial da curva de “tensão-deformação específica” é linear. A constante de proporcionalidade, ou inclinação da reta, é denominada módulo de elasticidade, único para cada material e mede sua dureza.

Em termos de comportamento mecânico de produtos agrícolas, muitos pesquisadores têm empregado os procedimentos e testes usados para materiais não biológicos, na tentativa de obterem dados mais significativos. Espécimes cilíndricos, retirados de materiais biológicos, foram submetidos a testes de compressão uniaxial, entre placas paralelas, para a determinação do módulo de elasticidade de maçã (Mohsenin et al., 1963) e batata (Finney et al., 1964). Zoerb & Hall (1960) e Shelef & Mohsenin (1966) determinaram o módulo de elasticidade de grãos agrícolas usando espécimes preparados ao se cortar as extremidades do produto.

A utilização de espécimes retirados do material biológico para a determinação do módulo de elasticidade, é bastante questionada. Quaisquer modificações de um material intacto, na tentativa de se obter um espécime com forma padrão, podem proporcionar resultados que se desviam do comportamento mecânico real do material biológico.

No caso de corpos convexos (grãos, frutos e vegetais intactos) a determinação do módulo de elasticidade por meio das curvas de “força versus 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. Mohsenin (1978) expõe uma solução para a determinação das tensões de contato em dois corpos convexos, elásticos e isotrópicos, quando pressionado um contra o outro, denominada teoria de Hertz, que envolve as seguintes considerações: (a) o material dos corpos em contato é homogêneo; (b) as forças aplicadas são estáticas; (c) o material possui comportamento elástico; as tensões de contato se anulam na extremidade oposta do corpo (corpo semi-infinito); o raio de curvatura do corpo é muito grande quando comparado com o raio da superfície de contato e (d) as superfícies dos corpos em contato são lisas o suficiente para que as forças tangenciais possam ser desprezadas.

No caso de um corpo convexo comprimido entre duas placas paralelas, os dados de “força-deformação”, provenientes dos testes de compressão do material, podem ser usados com o método de Hertz, para determinar um módulo de elasticidade aparente (E) 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 as placas superior e inferior), m
- μ - razão de Poisson
- r_1, R_1, r_2 e R_2 - raios de curvatura do corpo convexo nos pontos de contato, m

Para se determinar o módulo de elasticidade pela Eq. (1) é necessário a separação da deformação total do produto em suas partes elástica e plástica, o que requer a obtenção da curva de “força versus deformação” durante o carregamento e descarregamento do produto.

Fridley et al. (1968) investigaram a aplicabilidade da teoria da elasticidade na predição de curvas de “força-deformação” para pêssegos e pêras sob compressão. Frutos intactos foram comprimidos entre as placas paralelas de uma máquina universal de ensaios para a obtenção de curvas de “força-deformação”. Os módulos de elasticidade desses produtos foram determinados pela Eq. 2, válida para o contato compressivo de uma placa com uma esfera.

$$E = 0,57 \frac{F}{R^{1/2} D^{3/2}} \quad (2)$$

Aqui, R é o raio de curvatura do fruto, considerado esférico. Na determinação deste módulo, os pesquisadores usaram os valores experimentais das forças compressivas atuantes no produto, quando sua deformação era igual a 0,152 mm. Os valores dos módulos de elasticidade determinados para pêra e pêssego foram iguais a $5,31 \times 10^6$ e $1,03 \times 10^6 \text{ N m}^{-2}$, respectivamente.

As curvas teóricas de “força-deformação” foram obtidas usando-se a Eq. (3), proveniente da teoria de Hertz para compressão de uma placa contra uma esfera. Nesta equação foram usados módulos de elasticidade obtidos pela Eq. (2) e uma razão de Poisson igual a 0,49.

$$D = \left[\frac{9}{16} \frac{F^2}{E^2 R} (1-\mu^2)^2 \right]^{1/3} \quad (3)$$

Sendo a força proporcional à deformação elevada a 1,5 (teoria de Hertz) o gráfico de “força versus deformação”, em escala logarítmica deve produzir, teoricamente se o material for elástico, uma reta com inclinação igual a 1,5. Os autores

obtiveram, ainda, inclinações em torno de 1,4 a 1,6, e concluíram que, embora a relação “força-deformação” não siga precisamente a teoria da elasticidade, esta teoria fornece previsões razoáveis.

Um módulo de deformidade do produto pode ser obtido, também, pela Eq. (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 que o de elasticidade, pois quando um produto é comprimido, a deformação total é que tem aplicação prática.

Arnold & Roberts (1969) investigando o comportamento mecânico de grãos de trigo (11,5 a 13% b.u.) determinaram o módulo de deformidade do produto, após este ser submetido, intacto, à compressão entre placas paralelas. O módulo (multiplicado por $1/(1-\mu^2)$) para este produto, variou de $1,20 \times 10^9$ a $4,10 \times 10^9 \text{ N m}^{-2}$.

Kang et al. (1995) determinaram o módulo de deformidade de grãos de trigo usando espécimes de superfícies planas e paralelas, extraídos do produto. O módulo foi determinado como sendo a inclinação da curva “tensão-deformação específica”, proveniente de testes de compressão. Os resultados mostraram que o módulo aumentou com a taxa de compressão, até esta atingir 100 mm min^{-1} e, depois, diminuiu. Para variedade de trigo macio, o módulo diminuiu rapidamente quando o teor de umidade do produto foi aumentado de 14 para 18% b.s., enquanto, para variedade dura ele diminuiu lentamente. Os valores dos módulos variaram de 150 a 370 MPa.

Henry et al. (2000) trabalhando com compressão de soja entre placas paralelas, verificaram que os efeitos da variedade, velocidade de compressão, volume e teor de umidade podem, ser identificados de maneira eficiente, por meio de parâmetros elásticos derivados de um modelo, por eles desenvolvido, que expressa a força compressiva atuante no produto como função da deformação, expandida em uma série de Taylor.

Bargale et al. (1995) determinou o módulo de elasticidade e a tensão de contato máxima durante a compressão (placas paralelas) de soja e canola. Os resultados indicaram que os valores destas grandezas decrescem linearmente com um aumento do teor de umidade dos grãos.

Baryeh (2000) investigou algumas propriedades (módulo de elasticidade, grau de elasticidade e dureza) relacionadas com a resistência compressiva de abacate visando a determinação do número de camadas viáveis para o empilhamento do produto durante seu empacotamento em caixas de madeira. Os resultados indicaram que logo após a colheita e 15 dias após que esse acontecer, o número de camadas do produto que podem ser empilhadas é reduzida de 35 para 2.

Objetivou-se, com este trabalho, a determinação do módulo de deformidade de frutos de café em função das variáveis: (a) presença do pedúnculo no fruto; (b) velocidade de compressão; (c) grau de maturação dos frutos e (d) posição do produto durante a compressão.

MATERIAL E MÉTODOS

Nas determinações envolvidas neste estudo, trabalhou-se com frutos de café, variedade Catuaí Vermelho, colhidos

manualmente de plantas existentes na área de Armazenamento do Departamento de Engenharia Agrícola/Universidade Federal de Viçosa - MG. Os frutos foram colhidos nas cores mais pronunciadas de “cereja”, “verdoengo” e “verde” (detecção visual).

Para a 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 1000 N. 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%.

Três situações de posicionamento do produto durante os testes de compressão (P1, P2 e P3) foram investigadas e se encontram esquematizadas na Figura 1, onde o produto, na sua posição de maior estabilidade, se apóia em uma placa rígida.

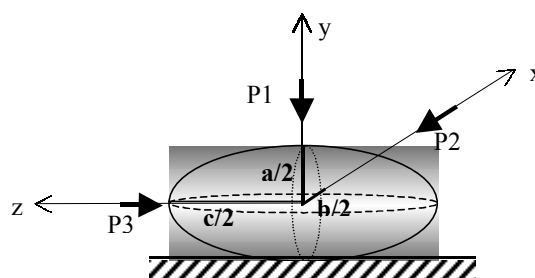


Figura 1. Esquema das posições de um fruto de café adotadas durante os testes de compressão do produto, entre placas paralelas

Para a determinação do módulo de deformidade em cada situação investigada, considerou-se a existência de planos de simetria nos frutos de café; desta 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; assim, a Eq. (1) fica simplificada e pode ser expressa como:

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

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; desta forma, resolveu-se criar uma nova variável, E' , proporcional ao módulo de deformidade, mencionada no texto como “módulo proporcional de deformidade”, definida como:

$$E' = \frac{E}{(1-\mu^2)} = \frac{0,531F}{D^{3/2}} \left[2 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (5)$$

Os dados provenientes das curvas de compressão “força-deformação específica”, foram transformados em “força-deformação” e usados na Eq. (5) 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, como mostrado na Figura 2. O fruto de café foi considerado um elipsóide, com dimensões principais iguais aos valores médios das dimensões, determinados experimentalmente para cada eixo de compressão.

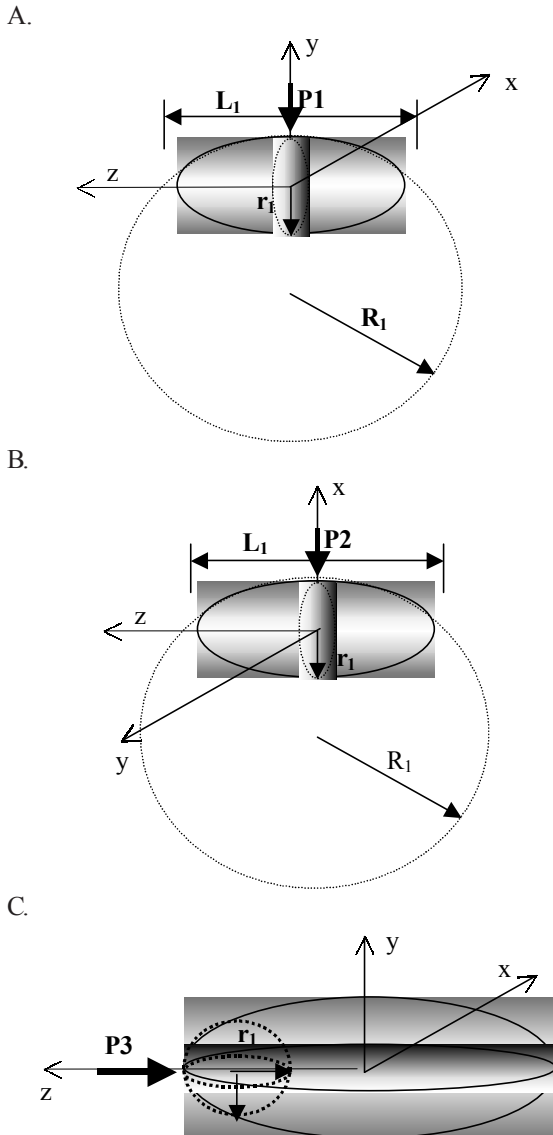


Figura 2. Raios de curvatura do fruto na região de contato “produto-placa compressora”, usados na determinação dos “módulos proporcionais de deformidade”, (A) compressão na posição P1, (B) compressão na posição P2 e (C) compressão na posição P3

Dois tipos de experimento denominados, no texto, “Experimento 1” e “Experimento 2”, foram realizados e detalhes das metodologias adotadas são descritas nos itens que seguem.

Experimento 1

No primeiro tipo de experimento trabalhou-se com frutos de café nos estádios de maturação “cereja” e “verde” e se investigaram os efeitos de (a) presença de pedúnculo em frutos “cereja” e (b) velocidade de compressão nos valores dos módulos de deformidade de frutos “cereja” e “verde”.

Para execução dos testes de compressão, os frutos cor “cereja” foram retirados com e sem o pedúnculo das plantas, enquanto com os frutos cor “verde” não houve esta preocupação.

Em todos os testes foram realizados ensaios com 20 frutos, em que cada fruto foi comprimido segundo sua posição mais estável (P1, Figura 1) pelas placas, rígidas e paralelas, da máquina de ensaios. As velocidades de compressão usadas foram de 0,5; 2,5; 5,0; 7,5 e 10 mm min⁻¹ e os ensaios foram realizados imediatamente depois da colheita; os teores de umidade dos frutos “verde” e “cereja” encontravam-se a (75,3 ± 0,1) e (65 ± 2)% b.u., respectivamente.

Experimento 2

No segundo tipo de experimento as variações nos valores dos módulos de deformidade foram determinadas em função do (a) grau de maturação dos frutos e (b) do local de aplicação no produto, das forças de compressão. Os frutos usados neste experimento encontravam-se em três estádios de maturação: “cereja”, a (69,9 ± 0,4)% b.u., “verdoengo”, a (75,7 ± 0,9)% b.u., e “verde”, a (72,0 ± 0,8)% b.u. Em cada teste foram comprimidos 50 frutos a uma velocidade de 5 mm min⁻¹. Três posições do produto durante a compressão (P1, P2 e P3) esquematizadas na Figura 1, foram testadas. Neste experimento não houve a preocupação de seleção dos frutos quanto à presença de pedúnculo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Experimento 1

A Figura 3 apresenta os valores médios das forças necessárias para produzir deformações específicas iguais a 1,0; 2,5; 3,5 e 5,0% nos frutos “cereja”, com e sem pedúnculo, e “verde”, depois de serem comprimidos na posição P1, a diferentes velocidades.

A determinação do “módulo proporcional de deformidade”, usando-se a Eq. (5) só é possível depois da obtenção das curvas de “força versus deformação” para o produto e dos raios de curvatura do fruto, na região de compressão. Para a obtenção dos raios de curvatura, os frutos, em cada estágio de maturação, foram considerados elipsóides com eixos principais a, b e c, como esquematizados na Figura 1. Os valores dessas dimensões (média para cem frutos) são apresentados na Tabela 1. Na transformação da “deformação específica” do produto

Tabela 1. Valores médios para as dimensões principais (a, b e c) dos frutos de café

Fruto	Dimensão Comprimida (mm)					
	Experimento 1			Experimento 2		
	a (P1)	b (P2)	c (P3)	a (P1)	b (P2)	c (P3)
Cereja	(12,3 ± 0,6)	(13 ± 1)	(15,0 ± 0,9)	(11,6 ± 0,9)	(13 ± 1)	(13 ± 1)
Verde	(11,0 ± 0,6)	(12 ± 1)	(14,8 ± 0,8)	(10 ± 1)	(10 ± 1)	(13 ± 1)
Verdoengo				(10,6 ± 0,8)	(12,3 ± 0,8)	(14 ± 1)

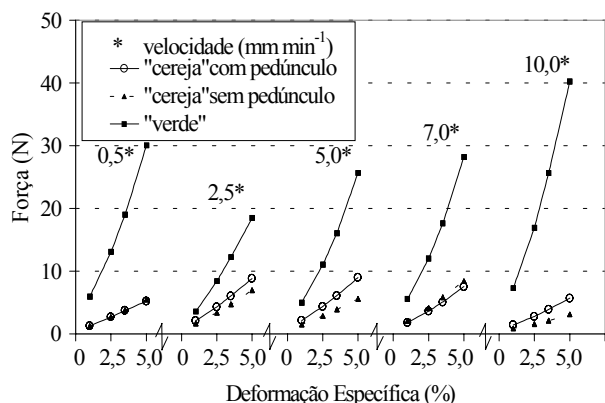


Figura 3. Forças necessárias para que frutos de café “cereja”, com e sem pedúnculos, e “verde” comprimidos a diferentes velocidades, atinjam determinados valores de deformação específica

em “deformação” do fruto, a dimensão “a”, correspondente à posição de compressão P1, foi multiplicada pela deformação específica (decimal) do produto.

Os valores dos raios de curvatura (r_1 e R_1) do corpo nos pontos de contato, independentemente da velocidade de compressão, foram obtidos por meio de ajustes de circunferências às curvaturas do corpo, segundo os planos coordenados relevantes à posição de compressão P1, como mostrado na Figura 2A. Os valores dos raios de curvatura obtidos (r_1 e R_1), nos planos coordenados (yz e yx) foram, respectivamente, iguais a 8,3 e 6,6 mm para frutos “cereja” e 8,9 e 6,2 mm para o produto “verde”.

Modelos polinomiais de até segundo grau, foram ajustados (regressão) aos dados experimentais de “força versus deformação” de cada combinação “estádio de maturação - velocidade de compressão”, sendo incluída a condição de deformação nula para uma força igual a zero. A resposta dos frutos de café mostrou-se linear e as equações ajustadas são apresentadas na Tabela 2, juntamente com os coeficientes de determinação (R^2) e as faixas de deformação para as quais as equações são válidas.

Tabela 2. Equações ajustadas para se expressar o comportamento da força (F, em N) atuante nos frutos e do módulo proporcional de deformidade (E' , em $N \cdot m^{-2}$) em função da deformação (D, em m)

Fruto	Velocidade ($mm \cdot min^{-1}$)	Equação para Força $F = d D + e$				Equação para o Módulo de Deformidade $E' = g D^h$			
		d	e	R^2	($10^{-6} m$) [*]	g	h	R^2	($10^{-6} m$) [*]
Cereja com pedúnculo	0,5	8297	0,1106	0,998	0 - 620	$1,68 \cdot 10^5$	0,530	1,000	200 - 620
	2,5	13980	-0,1132	0,998	0 - 618	$3,06 \cdot 10^5$	0,518	1,000	200 - 618
	5,0	14430	-0,1211	0,997	0 - 605	$3,13 \cdot 10^5$	0,519	1,000	200 - 605
	7,0	12000	-0,0885	0,997	0 - 610	$2,65 \cdot 10^5$	0,517	1,000	200 - 610
	10,0	8753,6	-0,1113	0,996	0 - 631	$1,79 \cdot 10^5$	0,528	1,000	200 - 631
Cereja sem pedúnculo	0,5	8836,5	0,0573	0,999	0 - 608	$1,98 \cdot 10^5$	0,515	1,000	200 - 608
	2,5	10909	0,0801	0,998	0 - 622	$2,41 \cdot 10^5$	0,517	1,000	200 - 622
	5,0	8660,1	0,1607	0,995	0 - 626	$1,63 \cdot 10^5$	0,541	1,000	200 - 626
	7,0	13292	0,1312	0,997	0 - 619	$2,83 \cdot 10^5$	0,522	1,000	200 - 619
	10,0	4841,9	0,0944	0,991	0 - 614	$8,97 \cdot 10^5$	0,543	1,000	200 - 614
Verde	0,5	54573	-0,4491	0,992	0 - 537	$1,58 \cdot 10^6$	0,478	1,000	200 - 537
	2,5	35182	-0,2250	0,997	0 - 519	$9,85 \cdot 10^5$	0,483	1,000	200 - 519
	5,0	44625	-0,4509	0,991	0 - 560	$1,33 \cdot 10^6$	0,473	1,000	200 - 560
	7,0	48103	-0,4776	0,990	0 - 570	$1,43 \cdot 10^6$	0,474	1,000	200 - 570
	10,0	69786	-0,9873	0,991	0 - 567	$2,25 \cdot 10^6$	0,462	1,000	200 - 567

* Faixa de deformação

Quando a força de compressão atuante em um produto é função linear da sua deformação e quando o termo constante da equação resultante pode ser desprezado, verifica-se, da Eq. (5) que o módulo proporcional de deformidade se torna função potencial da deformação, que apresenta um expoente igual a -0,5. Uma investigação da contribuição percentual dos termos constantes, presentes nas equações da Tabela 2, para os valores da força total atuante no produto em função das deformações foi, então, realizada. Observa-se que a contribuição desses termos (Figura 4), diminui com o aumento da deformação, apresentando valores grandes para pequenas deformações. Nota-se, em todos os casos, que a contribuição média do termo constante é igual ou menor a 5% a partir de uma deformação de 0,0002 m.

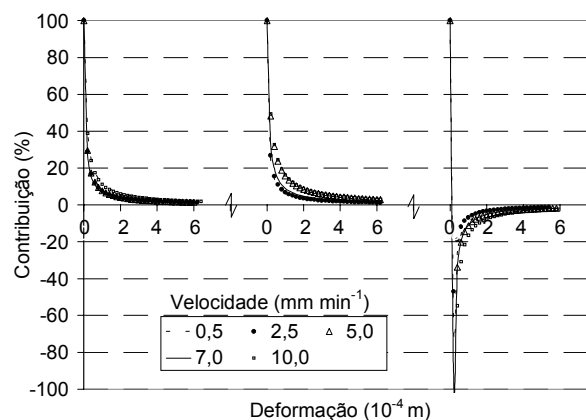


Figura 4. Contribuição percentual dos termos constantes das equações na Tabela 2, para os valores da força total atuante no produto, em função das deformações

Neste trabalho, a Eq. (5) foi usada de duas maneiras para a determinação de módulos proporcionais de deformidade; no primeiro modo, cada par de valores experimentais de força-deformação (correspondente às deformações específicas de 1,0, 2,5, 3,5 e 5,0%) foi introduzido na Eq. (5) e os módulos resultantes foram denominados, no texto “experimentais”,

enquanto no segundo modo cada equação para “força versus deformação” (Tabela 2) foi inserida na Eq. (5) e o módulo proporcional de deformidade tornou-se função apenas da deformação do produto. Usando-se valores de deformação igualmente espaçados, esta equação foi usada para construir tabelas de E’- deformação. Os valores de deformação utilizados variaram de 0,0002 m até o valor máximo da faixa de validade de cada uma das equações para força, presentes na Tabela 2.

Modelos potenciais foram ajustados (regressão) aos dados do módulo proporcional de deformidade versus deformação, para cada velocidade de compressão e estágio de maturação do fruto, e as equações ajustadas com os respectivos coeficientes de determinação, e as faixas de deformação para as quais as equações são válidas, encontram-se na Tabela 2. As curvas dessas equações e os valores dos módulos proporcionais de deformidade “experimentais” podem ser visualizados na Figura 5, para as diferentes velocidades de compressão dos frutos nos dois estádios de maturação.

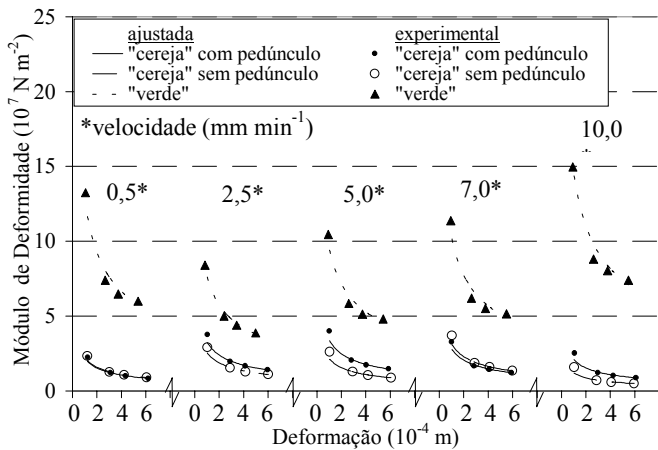


Figura 5. Módulo proporcional de deformidade em função da deformação de frutos de café em diferentes estádios de maturação, comprimidos a diferentes velocidades

Observa-se, na Figura 5, que os módulos proporcionais de deformidade determinados para frutos “verde”, independentemente da velocidade de compressão, foram os maiores indicando, assim, que, para se obter determinada deformação desses frutos, é necessária a aplicação de uma força maior que aquela requerida pelos frutos “cereja”, ou seja, frutos “verde” são mais duros que os “cereja”. Os módulos determinados para frutos “cereja” com e sem pedúnculo, têm valores bastante próximos uns dos outros, principalmente para velocidades de compressão de 0,5 e 7,0 mm min⁻¹. Nas outras velocidades, os módulos dos frutos sem pedúnculo parecem ter valores ligeiramente inferiores àqueles apresentados pelos frutos com pedúnculo devido, possivelmente, à maior facilidade de saída de líquido do produto.

É interessante notar, também, que o módulo proporcional de deformidade, da maneira que foi determinado, é dependente da deformação do produto; quanto maior for a deformação, menor será o valor do módulo.

As equações ajustadas para expressar a variação do módulo proporcional de deformidade em função da deformação do produto, foram usadas em um intervalo de deformação (0,000200

a 0,000519 m) comum a todos os frutos e velocidades de compressão, para se efetuar algumas comparações. A Figura 6 mostra a razão entre os valores do módulo proporcional de deformidade obtido para o produto comprimido a diferentes velocidades e aquele obtido para o fruto comprimido a 0,5 mm min⁻¹. Observa-se que, para os frutos “cereja”, os valores dos módulos para o produto comprimido a uma velocidade de 0,5 mm min⁻¹ são, na maioria dos casos, menores que os obtidos para frutos comprimidos nas outras velocidades. Quando se trata de frutos “verde”, no entanto, os valores dos módulos obtidos para o produto comprimido a 0,5 mm min⁻¹ são os maiores, em que exceção se faz aos módulos dos frutos submetidos a uma velocidade de compressão de 10 mm min⁻¹.

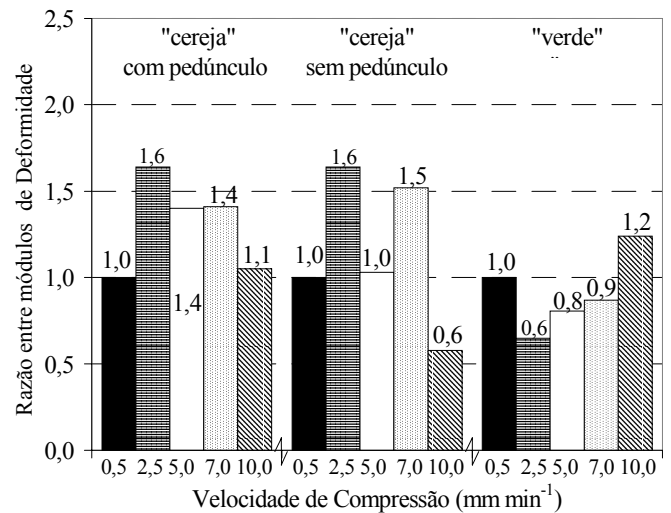


Figura 6. Razão entre os valores do módulo proporcional de deformidade, obtida para o produto comprimido a diferentes velocidades e aquele obtido para o fruto comprimido a 0,5 mm min⁻¹

A Figura 7 mostra, para as diferentes velocidades de compressão, a razão entre os valores do módulo proporcional de deformidade obtido para o produto “verde” e aqueles obtidos para frutos “cereja” com e sem pedúnculo. Nesta figura

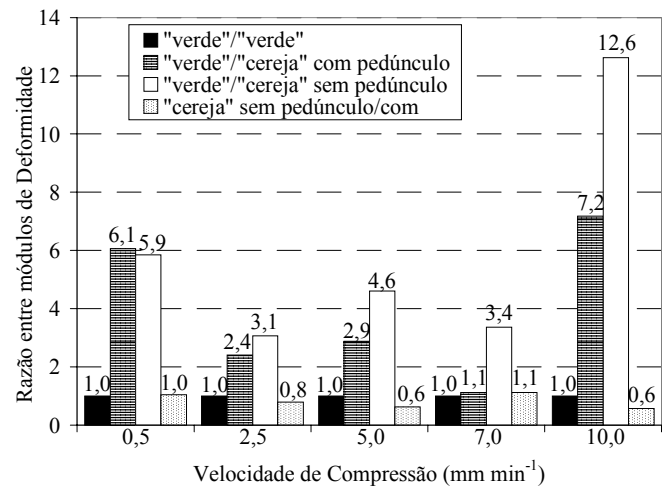


Figura 7. Razão entre os valores do módulo proporcional de deformidade obtido para o produto “verde” e aqueles obtidos para frutos “cereja”, com e sem pedúnculo, e razão entre os módulos de frutos “cereja” sem e com pedúnculo

encontra-se, também, a razão entre os módulos de frutos “cereja” sem e com pedúnculo; observa-se que, para todas as velocidades de compressão, os valores do módulo do fruto “verde” foram superiores aos dos frutos “cereja”, mas os módulos dos frutos “cereja” sem pedúnculo foram superiores aos daqueles com pedúnculo apenas para velocidades de compressão de 0,5 e 7,0 mm min⁻¹.

A Figura 8 apresenta o comportamento do módulo de deformidade do produto, em função da velocidade de compressão para deformações iguais a 0,000200, 0,000360 e 0,000519 m. As linhas que unem os pontos foram traçadas para facilitar a visualização das tendências. Pode-se observar, ainda, efeito diferenciado da velocidade de compressão no comportamento dos módulos dos frutos “cereja”, com e sem pedúnculo, e o produto “verde”. Os módulos dos frutos “cereja” com pedúnculo aumentam até que a velocidade de compressão atinja o valor de 5 mm min⁻¹, e a seguir decrescem; já os módulos dos frutos “verde” decrescem quando a velocidade de compressão varia de 0,5 para 2,5 mm min⁻¹ e, a seguir, os módulos aumentam, com acréscimos na velocidade. Os módulos de fruto “cereja” sem pedúnculo inicialmente crescem, com o aumento de velocidade e a seguir diminuem, tornam a crescer novamente e, finalmente, decrescem, apresentando menor valor quando o produto é submetido a uma velocidade de 10 mm min⁻¹.

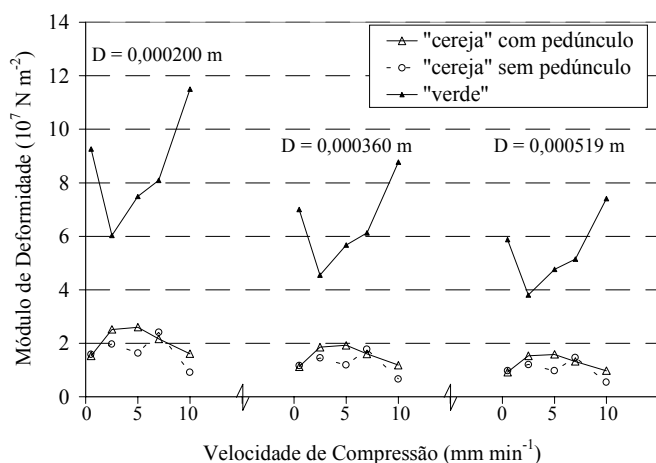


Figura 8. Variação do módulo proporcional de deformidade com a velocidade de compressão do produto

Os módulos proporcionais de deformidade para frutos “cereja” com pedúnculo variaram de $(1,3 \pm 0,3) 10^7$ até $(2,1 \pm 0,5) 10^7$ N m⁻², para velocidades de compressão de 0,5 e 5 mm min⁻¹, respectivamente; já os módulos dos “cereja” sem pedúnculo variaram de $(1,0 \pm 0,3) 10^7$ até $(1,7 \pm 0,6) 10^7$ N m⁻², para velocidades de compressão de 10,0 e 7,0 mm min⁻¹, respectivamente. Observa-se que as faixas de valores para os módulos dos frutos “cereja” com e sem pedúnculo, se sobrepõem indicando que, possivelmente, não diferem um do outro; entretanto, o mesmo não acontece com os frutos do produto “verde”, cujos módulos proporcionais de deformidade para frutos “verde” variaram de $(5 \pm 1) 10^7$ até $(8 \pm 2) 10^7$ N m⁻², para velocidades de compressão de 2,5 e 10,0 mm min⁻¹, respectivamente.

Em média, para todas as deformações o menor módulo $(7 \pm 1) 10^6$ N m⁻², ocorreu para fruto “cereja” comprimido sem pedúnculo, a uma velocidade de 10 mm min⁻¹ e o maior, $(9 \pm 1) 10^7$ N m⁻², para o “verde”, comprimido na mesma velocidade.

Observa-se que, quando se desconsidera o efeito da velocidade de compressão, os valores dos módulos dos frutos “cereja” com e sem pedúnculo, e “verde”, foram, respectivamente, iguais a $1,6 10^7$, $1,3 10^7$ e $6,6 10^7$ N m⁻² e apresentaram coeficientes de variação médios iguais a 15,8; 16,0 e 14,3%. Ao se desconsiderar o efeito da deformação, os coeficientes de variação médios dos módulos variaram de 14,0% (fruto “verde”, 10 mm min⁻¹) até 16,5% (“cereja” sem pedúnculo, 10 mm min⁻¹) que se encontram na mesma faixa de valores obtida quando se desprezou o efeito da velocidade, o que é um indicativo de que os valores do módulo foram similarmente afetados pelos diferentes valores de deformação do produto e pela velocidade de compressão.

Experimento 2

A Figura 9 apresenta os valores médios das forças necessárias para produzir deformações específicas iguais a 1,0; 2,5; 3,5 e 5,0% nos frutos de café em três estádios de maturação (“cereja”, “verdoengo” e “verde”) comprimidos em três posições (P1, P2 e P3).

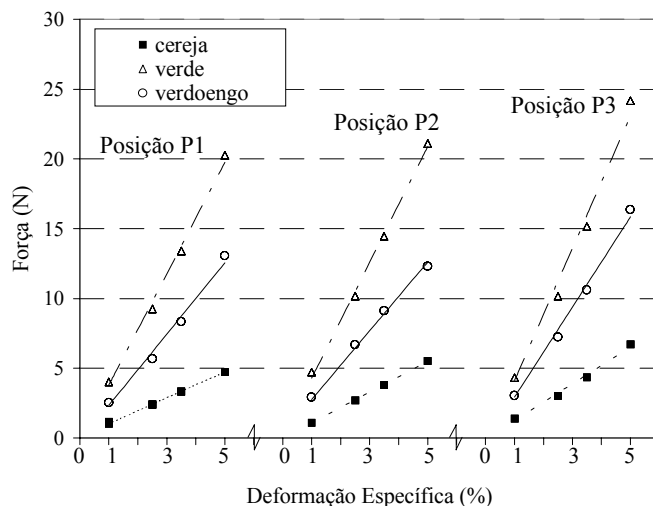


Figura 9. Forças necessárias para que frutos de café atinjam determinados valores de deformação específica

Para a obtenção do “módulo proporcional de deformidade” usando-se a Eq. (5) é essencial a determinação da curva de “força versus deformação” para o produto, e dos raios de curvatura do fruto. Para a obtenção dos raios de curvatura, usaram-se os valores médios das dimensões a, b e c (Fig. 1) de 150 frutos em cada estágio de maturação. Esses valores são apresentados na Tabela 1 (correspondentes ao “Experimento 2”).

Para se investigar se as dimensões dos frutos em diferentes estádios de maturação, nos três eixos de compressão, poderiam ser consideradas equivalentes, os dados experimentais das dimensões dos frutos foram submetidos a testes de comparação de médias (Newman - Keuls, 5% de probabilidade). Os resultados mostraram, na grande maioria dos casos, que (1) as

três dimensões principais de frutos em um mesmo estágio de maturação são diferentes ($c > b > a$) e (2) para cada posição de compressão, as dimensões dos frutos em diferentes estádios de maturação também diferem (“cereja” > “verdoengo” > “verde”); a forma do fruto de café não pode ser considerada esférica visto que, em cada estágio de maturação, ele foi considerado um elipsóide cujos valores dos eixos principais (a , b e c) são aqueles apresentados na Tabela 1; cada uma dessas dimensões foi usada na obtenção dos raios de curvatura e, também, na transformação da deformação específica do produto em deformação do fruto. Para se obter a deformação do fruto em cada posição de compressão, o valor da dimensão comprimida foi multiplicado pela deformação específica (decimal) do produto.

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, como mostrado na Figura 2. Os valores dos raios de curvatura obtidos para cada caso investigado, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Raios de curvatura (mm) dos frutos de café a 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

Modelos polinomiais de até segundo grau, foram ajustados (regressão) aos dados experimentais de “força versus deformação”, sendo incluída a condição de deformação nula para uma força igual a zero. A resposta dos frutos de café mostrou-se linear e as equações ajustadas são apresentadas na Tabela 4, juntamente com os coeficientes de determinação, (R^2) e as faixas de deformação para as quais as equações são válidas.

A Figura 10 apresenta a contribuição percentual dos termos constantes presentes nas equações da Tabela 4, para os valores da força total atuante no produto, em função das deformações.

Tabela 4. Equações ajustadas para expressar o comportamento da força (F, em N) atuante nos frutos e do módulo proporcional de deformidade (E' , em $N\ m^{-2}$) em função da deformação (D, em m)

Fruto	Posição	Equação para Força $F = d D + e$				Equação para o Módulo de Deformidade $E' = g D^h$			
		d	e	R^2	(10^{-6} m)***	g	h	R^2	(10^{-6} m)***
Cereja	P1	7950,5	0,1000	0,998	0 - 582	$1,589 \times 10^5$	0,535	0,9999	180 - 582
	P2	8656,3	-0,0182	1,000	0 - 637	$2,423 \times 10^5$	0,494	1,0000	180 - 637
	P3	9820,4	-0,0480	0,995	0 - 668	$2,990 \times 10^5$	0,486	1,0000	180 - 668
Verde	P1	42024	-0,1979	0,997	0 - 475	$1,258 \times 10^6$	0,486	1,0000	180 - 475
	P2	42034	0,1284	0,999	0 - 494	$1,103 \times 10^6$	0,509	1,0000	180 - 494
	P3	37079	-0,6219	0,990	0 - 640	$1,733 \times 10^6$	0,449	0,9996	180 - 640
Verdoengo	P1	24050	-0,2137	0,993	0 - 531	$7,099 \times 10^5$	0,474	0,9999	180 - 531
	P2	19964	0,3065	0,997	0 - 616	$4,141 \times 10^5$	0,542	0,9998	180 - 616
	P3	25230	-0,2939	0,995	0 - 640	$9,487 \times 10^5$	0,465	0,9998	180 - 640

*** Faixa de deformação

Observa-se que, a partir de uma deformação de 0,00018 m, a contribuição diminui consideravelmente sendo, em média, para as posições P1, P2 e P3, respectivamente, iguais a 3,6; -0,6 e -1,4%, para frutos “cereja”, -1,6; -0,9 e -5,1%, para frutos “verde”, e -2,9; 4,2 e -3,3%, para frutos “verdoengo”.

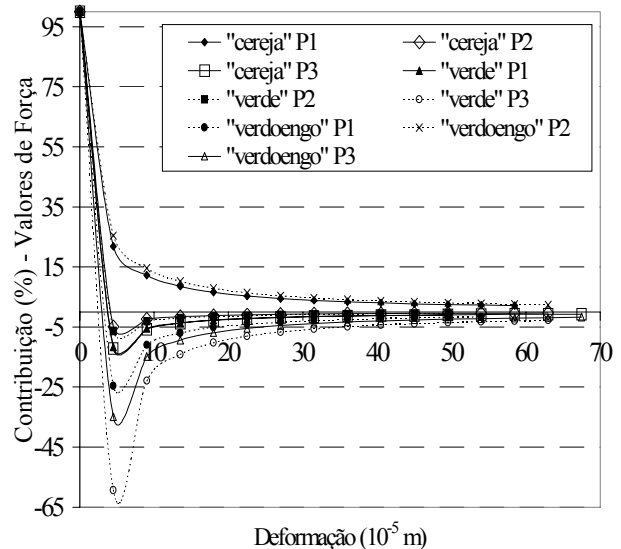


Figura 10. Contribuição percentual dos termos constantes das equações na Tabela 4 para os valores da força total atuante no produto, em função das deformações

A mesma técnica empregada no “Experimento 1” para a determinação do módulo proporcional de deformidade, foi usada neste segundo experimento. As 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 com os respectivos coeficientes de determinação, encontram-se na Tabela 4. As curvas dessas equações e os módulos “experimentais” podem ser visualizados na Figura 11.

Observa-se, na mesma figura, que existe tendência dos valores do módulo diminuírem com o aumento de deformação do fruto e se nota, também, que os valores dos módulos de deformidade para frutos “verde” foram maiores, enquanto aqueles para o produto “cereja” foram menores.

Em média, para todas as deformações o menor módulo, ($1,2 \pm 0,2$) $10^7\ N\ m^{-2}$, ocorreu para fruto “cereja” comprimido na

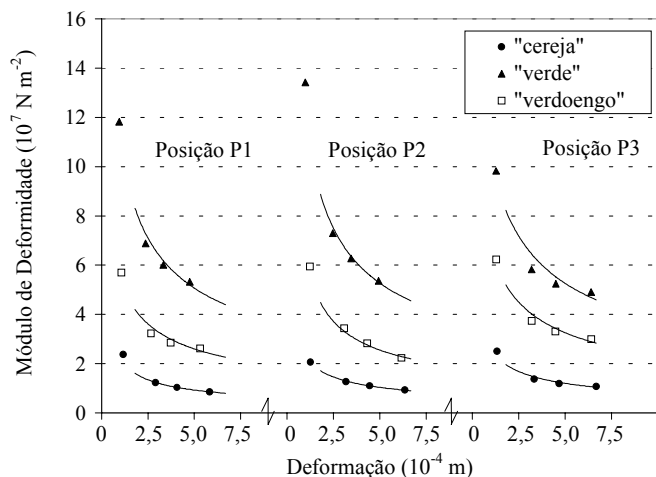


Figura 11. Valores determinados para os módulos proporcionais de deformidade, E' , de frutos, em diferentes estádios de maturação e comprimidos em diferentes posições, em função das deformações

posição P1, e o maior (7 ± 1) 10^7 N m⁻², para o “verde”, comprimido na posição P2. A Figura 12 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 se encontra, também, a razão entre os módulos de frutos comprimidos na posição P3 e P2 e observa-se que, para os frutos “verde”, a posição de compressão do produto parece afetar muito pouco os valores dos módulos de deformidade mas, 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.

A Figura 13 mostra, para as três posições de compressão do produto, a razão entre os valores do módulo proporcional de deformidade obtido para o produto “verde” e aqueles obtidos para frutos “cereja” e “verdoengo”. Nesta figura encontra-se, também, a razão entre os módulos de frutos

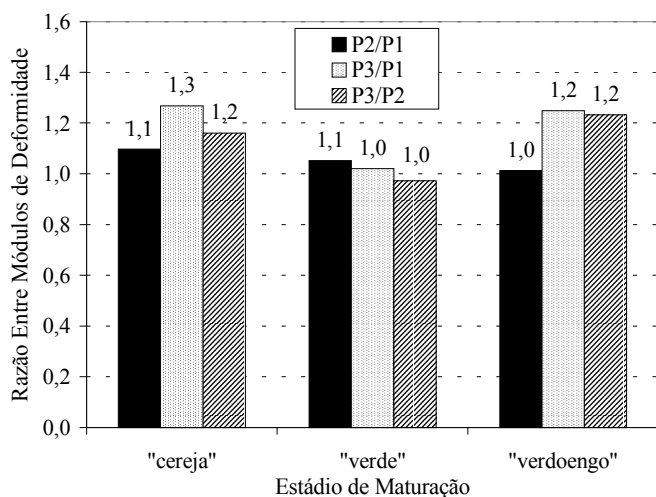


Figura 12. Razão entre os valores dos módulos proporcionais de deformidade obtidos para o produto comprimido nas diferentes posições de compressão

“verdoengo” e “cereja”, observando-se que, 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 que os do “verdoengo”.

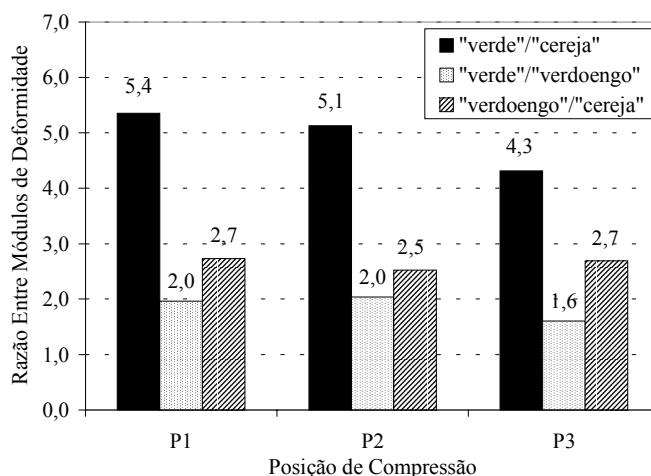


Figura 13. Razão entre os valores dos módulos proporcionais de deformidade obtidos para o produto em diferentes estádios de maturação

CONCLUSÕES

1. O módulo proporcional de deformidade é dependente do valor da deformação do fruto; quanto maior for a deformação, menor será o valor do módulo.
2. A velocidade de compressão tem influência nos valores dos módulos dos frutos. O comportamento do módulo dos frutos, com a variação da velocidade de compressão, é diferenciado, dependendo do estágio de maturação do produto.
3. Os módulos proporcionais de deformidade de frutos “verde”, independentemente da velocidade de compressão, foram maiores que aqueles para o produto “cereja”.
4. Não existem razões para se considerar os módulos dos frutos “cereja” com e sem pedúnculo diferentes; os intervalos de variação dos módulos se sobrepõem.
5. 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.
6. 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 que os do “verdoengo”.

LITERATURA CITADA

Agricultural Engineers Yearbook of Standards. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, 1994. 819p.

- Arnold, P.C.; Roberts, A.W. Fundamental aspects of load-deformation behavior of wheat grains. *Transactions of the ASAE, St. Joseph*, v.12, n.1, p.104-108, 1969.
- Bargale, P.C.; Irudayaraj, J.; Marquis, B. Studies of rheological behaviour of canola and wheat. *Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe*, v.61, n.2, p.267-274, 1995.
- Baryeh, E.A. Strength properties of avocado pear. *Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe*, v.76, n.4, p.389-397, 2000.
- Finney, E.E.; Hall, C.W.; Mase, G.E. Theory of linear viscoelasticity applied to potato. *Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe*, v.9, n.4, p.307-312, 1964.
- Fridley, R.B.; Bradley, R.A.; Rumsey, J.W.; Adrian, P.A. Some aspects of elastic behavior of selected fruits. *Transactions of the ASAE, St. Joseph*, v.11, n.1, p.46-49, 1968.
- Henry, Z.A.; Su, B.; Zhang, H. Resistance of soya beans to compression. *Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe*, v.76, n.2, p.175-181, 2000.
- Kang, Y.S.; Spillman, C.K.; Steele, J.L.; Chung, D.S. Mechanical properties of wheat. *Transactions of the ASAE, St. Joseph*, v.38, n.2, p.573-578, 1995.
- Mohsenin, N.N. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. 2. ed. London: Gordon and Breach Science Publishers. 1978. 742p.
- Mohsenin, N.N.; Cooper, H.E.; Tukey, L.D. Engineering approach to evaluation of textural factors in fruits and vegetables. *Transactions of the ASAE, St. Joseph*, v.6, n.2, p.85-88 e 92. 1963.
- Segerlind, L.J. *Applied finite element analysis*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons. 1984. 427p.
- Shelef, L.; Mohsenin, N.N. Moisture relations in germ-endosperm and whole corn kernel. *Cereal Chemistry, St. Paul, Minnesota*, 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, Silsoe*, v.5, n.1, p.83-92. 1960.