

## SIMULAÇÃO DE ESFORÇOS DE COMPRESSÃO EM MODELO COMPUTACIONAL DE FRUTO DE CAFEIEIRO

JANIELLE SOUZA PEREIRA<sup>1</sup>, RICARDO RODRIGUES MAGALHÃES<sup>2</sup>, FÁBIO LÚCIO SANTOS<sup>3</sup>, EDNILTON TAVARES DE ANDRADE<sup>4</sup>, LEOMAR SANTOS MARQUES<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Eng. Agrícola, Doutoranda em Engenharia Agrícola, Depto. de Engenharia Agrícola, DEG/UFLA, Lavras – MG, janielle.engenheira@gmail.com

<sup>2</sup> Eng. Industrial, Prof. Adjunto Doutor, Departamento de Engenharia Agrícola, DEG/UFLA, Lavras – MG

<sup>3</sup> Eng. Agrícola, Prof. Associado Doutor, Departamento de Engenharia Agrícola, DEG/UFLA, Lavras – MG

<sup>4</sup> Eng. Agrícola, Prof. Titular Doutor, Departamento de Engenharia Agrícola, DEG/UFLA, Lavras – MG

<sup>5</sup> Eng. Mecânico, Doutorando em Engenharia Agrícola, Depto. de Engenharia Agrícola, DEG/UFLA, Lavras – MG

Apresentado no  
LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2023  
18 a 21 de outubro de 2023 – Ribeirão Preto - SP, Brasil

**RESUMO:** O café, produto que contribui para o produto interno bruto do Brasil, tem sua qualidade associada à integridade física do fruto, assim, deve-se atentar para os danos causados ao fruto, devido aos processos mecânicos a que é submetido. Este estudo objetivou analisar a deformação, a energia de deformação e a tensão equivalente de von Mises do fruto do café nos estádios maduro, semi-maduro e imaturo, após ser comprimido a forças de colapso. Simulou-se, via Método dos Elementos Finitos, um processo de compressão de fruto do cafeeiro em três posicionamentos (x, y e z), com dados de entrada valores como a força de colapso, o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e densidade. Verificou-se que quanto mais maduro o fruto, maior a deformação média associada (2,20 mm mm<sup>-1</sup>), menor a energia de deformação média (0,07 mJ) e mais baixa tensão de von Mises média (0,25 Mpa). Desta forma, quanto mais maduro o fruto, maior a probabilidade de ocorrência de injúrias, comprometendo a qualidade do café.

**PALAVRAS-CHAVE:** café, danos mecânicos, deformação

### SIMULATION OF COMPRESSIVE STRESSES IN A COMPUTATIONAL MODEL OF A COFFEE FRUIT

**ABSTRACT:** Coffee, a product that contributes to the gross domestic product of Brazil, has its quality associated with the physical integrity of the fruit, so attention should be paid to the damage caused to the fruit due to the mechanical processes to which it is subjected. This study aimed to analyze the deformation, the strain energy and the von Mises equivalent stress of the coffee fruit in the mature, semi-mature and immature stages, after being compressed to collapse forces. A compression process of coffee fruit in three positions (x, y and z) was simulated via the Finite Element Method, with input data such as collapse force, modulus of elasticity, Poisson's ratio and density. It was found that the more mature the fruit, the higher the associated average strain (2.20 mm mm<sup>-1</sup>), the lower the average strain energy (0.07 mJ) and the lower the average von Mises stress (0.25 Mpa). Thus, the more mature the fruit, the greater the probability of injury occurring, compromising the quality of the coffee.

**KEYWORDS:** coffee, mechanical damage, deformation

**INTRODUÇÃO:** O Brasil é responsável pela maior produção mundial de café, produzindo em 2021 cerca de 48 milhões de sacas, e desta forma contribui para o produto interno bruto (PIB) do país (ICO, 2021). No entanto, para que o café continue contribuindo, efetivamente, para o desenvolvimento econômico do país, deve-se atentar para os danos causados a esse fruto devido aos processos mecânicos a que é submetido, os quais modificam o sabor, o aroma e a cor (COELHO et al., 2015). Uma das formas de se alterar os processos mecânicos durante o processamento do café, os quais podem induzir injúrias aos frutos, consiste no estudo e avaliação de cenários que resultem em danos nos frutos a partir de simulação computacional. Neste contexto, este estudo objetivou analisar a deformação, a energia de deformação e a tensão equivalente de von Mises do fruto do café nos estádios de maturação maduro, semi-maduro e imaturo, após ser comprimido a forças de colapso.

**MATERIAL E MÉTODOS:** Desenvolveu-se no software comercial SolidWorks® modelos geométricos de frutos de café nos estádios de maturação maduro, semi-maduro e imaturo (Figura 1) para simulações no software comercial Ansys® versão 14.5. O modelo considerou as dimensões encontradas por Tinoco et al. (2014) para o *Coffea arabica* L. variedade Colombia (0,013 m na circunferência menor (x) e 0,017 m na maior (z)). Para realização das simulações adotou-se o material estudado como tendo elasticidade isotrópica e como dados de entrada valores da força de colapso (F) (50; 195; 231,0 N, respectivo a fruto maduro, semi-maduro e verde), do módulo de elasticidade ou de Young (E) (2,93 MPa - fruto maduro; 19,57 MPa - fruto semi-maduro; 15,82 Mpa - fruto verde), do coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) (0,27; 0,25; 0,24, fruto maduro, semi-maduro e verde, respectivamente) e da densidade (1020; 1087; 1130 kg m<sup>-3</sup>, respectivo a fruto maduro, semi-maduro e verde), determinados por Couto et al., 2002 e Coelho et al., 2015. Com os dados de entrada e da configuração dos cenários a serem estudados realizou-se simulações computacionais para determinar os parâmetros: deformação total, a distribuição da energia de deformação e da tensão equivalente de von Mises, conforme equações 1, 2 e 3, respectivamente.

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_{xx} \ \epsilon_{yy} \ \epsilon_{zz} \ \epsilon_{xy} \ \epsilon_{xz} \ \epsilon_{yz}\} \quad (1)$$

em que,

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \ \epsilon_{yy} = \frac{\partial s}{\partial y}, \ \epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}, \ \epsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial s}{\partial x}, \ \epsilon_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \ \epsilon_{yz} = \frac{\partial s}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}$$

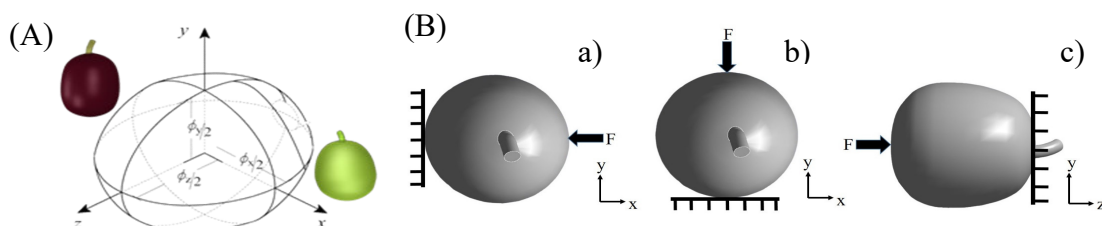
$$\mu = \int_0^E \sigma \cdot d\epsilon \quad (2)$$

em que,

$$\sigma = \frac{F}{A}, \ d\epsilon = \frac{\partial x}{l}$$

$$\sigma_{\text{vonMises}} = \sqrt{\frac{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}{2}} \quad (3)$$

Figura 1. Modelo 3D do fruto do cafeeiro com as dimensões nos eixos x ( $\phi_x$ ), y ( $\phi_y$ ) e z ( $\phi_z$ ) (A); Planos de aplicação da força (F) no fruto do cafeeiro: eixo x (a), eixo y (b) e eixo z (c) (B).



**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Com a realização da simulação numérica observou-se que o fruto maduro apresentou os máximos valores de deformação, devido à menor resistência da camada externa de revestimento (TINOCO et al.; 2014), sendo de  $3,63 \text{ mm mm}^{-1}$ ,  $1,49 \text{ mm mm}^{-1}$  e  $1,47 \text{ mm mm}^{-1}$ . Para o semi-maduro os valores foram de  $0,57 \text{ mm mm}^{-1}$ ,  $0,55 \text{ mm mm}^{-1}$  e  $1,21 \text{ mm mm}^{-1}$ ; e para o imaturo de  $0,94 \text{ mm mm}^{-1}$ ,  $0,86 \text{ mm mm}^{-1}$  e  $0,84 \text{ mm mm}^{-1}$ , respectivos à aplicação de carregamento nos eixos x, y e z (Figura 2).

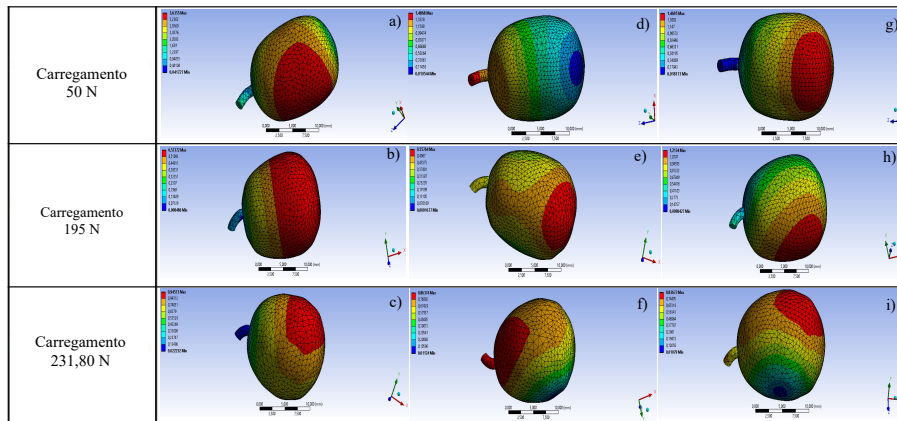


Figura 2. Deformação total ( $\text{mm mm}^{-1}$ ) do fruto do cafeeiro maduro, semi-maduro e imaturo quando submetido aos carregamentos de 50 N, 195 N e 231,80 N nos eixos x (a, b, c), y (d, e, f) e z (g, h, i), respectivamente.

Ao analisar a distribuição de energia de deformação, observou-se que os valores máximos foram encontrados no ponto de fixação do suporte de compressão, sendo de 0,06 mJ, 0,05 mJ e 0,11 mJ no fruto maduro; de de 0,31 mJ, 0,20 mJ e 0,12 mJ no fruto semi-maduro; e de 0,47 mJ, 0,25 mJ e 0,31 mJ no imaturo, respectivos à aplicação de força nos eixos x, y e z (Figura 3), com maior valor encontrado neste último, devido à maior resistência à deformação encontrada nesse estágio de maturação (CHAKESPARI et al.; 2010).

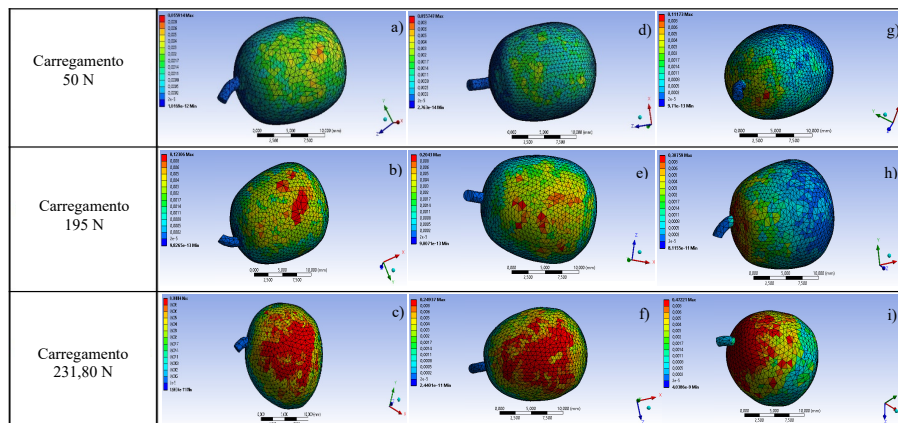


Figura 3. Distribuição da energia de deformação (mJ) no fruto do cafeeiro maduro, semi-maduro e imaturo quando submetido a força de 50 N, 195 N e 231,80 N nos eixos x (a, b, c), y (d, e, f) e z (g, h, i), respectivamente.

Em relação à tensão de von Mises observou-se que os valores máximos para a aplicação de força nos eixos x, y e z foram de 0,18 MPa, 0,18 MPa e 0,39 MPa, respectivamente (Figura 4); resultados que demonstram maiores valores de tensões de von Mises na região de engaste do fruto, significando maior concentração de tensão nesses locais e, conseqüentemente, maior probabilidade de colapso. E também se percebeu que foi no fruto imaturo que ocorreram as maiores tensões, resultados esses que corroboram com Santos et al. (2015).

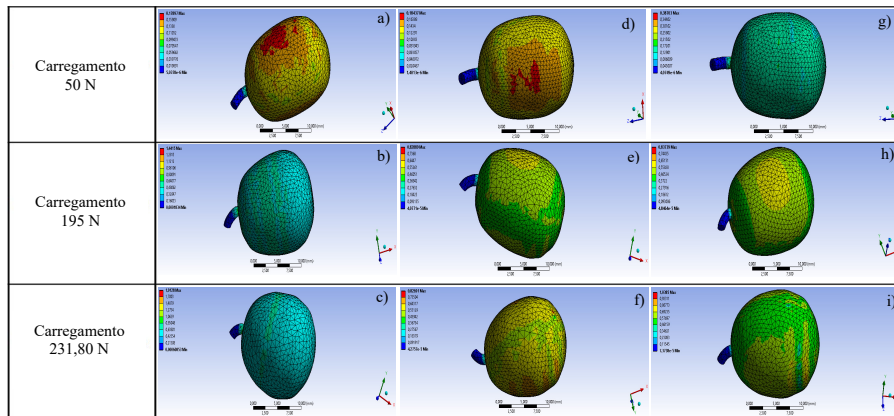


Figura 4. Distribuição da tensão equivalente de von Mises (MPa) no fruto do cafeeiro maduro, semi-maduro e imaturo quando submetido a força de 50 N, 195 N e 231,80 N nos eixos x (a, b, c), y (d, e, f) e z (g, h, i), respectivamente.

**CONCLUSÕES:** A realização da simulação do processo de compressão de frutos de cafeeiro possibilitou verificar que quanto mais maduro o fruto, maior a deformação média associada (2,20 mm mm<sup>-1</sup>), menor a energia de deformação média (0,07 mJ) e mais baixa tensão de von Mises média (0,25 Mpa). Desta forma, quanto mais maduro o fruto, maior a probabilidade de ocorrência de injúrias que poderão comprometer a qualidade do café.

**AGRADECIMENTOS:** Os autores agradecem o apoio financeiro das agências CAPES, CNPq e Fapemig.

#### REFERÊNCIAS:

CHAKESPARI, A. G., RAJABIPOUR, A., MOBILI, H. Strength behavior study of apples (cv. Shafi Abadi & Golab Kohanz) under compression loading. **Modern Applied Science**, v. 4, n. 7, p. 173-182, 2010.

COELHO, A. L., SANTOS, F. L., PINOT, F. A. C., QUEIROZ, D. M. Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 286–292, 2015.

COUTO, S. M., BATISTA, C. S., DEVILLA, I. A., PAIM, V. T. Características de frutos de café sob compressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 117-122, 2002.

ICO – International Coffee Organization. (2021). **Trade statistics tables: coffee production by exporting countries**. Disponível em: < <https://www.ico.org/prices/po-production.pdf> >. Acesso em 26 de novembro de 2021.

SANTOS, F. L., QUEIROZ, D. M., VALENTE, D. S. M., COELHO, A. L. F. (Simulation of the dynamic behavior of the coffee fruit-stem system using finite element method. **Acta Scientiarum Technology**, v. 37, n. 1, p. 11-17, 2015.

TINOCO, H. A., OCAMPO, D. A., PEÑA, F. M., SANZ-URIBE, J. R. Finite element modal analysis of the fruit-peduncle of *Coffea arabica* L. var. Colombia estimating its geometrical and mechanical properties. **Computers and Electronics in Agriculture**, n. 108, p. 17-27, 2014.