



PAULA BEATRIZ MARTINS FONSECA

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DO ENDOCARPO DE
FRUTOS DE MACAÚBA SOB COMPRESSÃO**

LAVRAS – MG

2022

PAULA BEATRIZ MARTINS FONSECA

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DO ENDOCARPO DE FRUTOS DE MACAÚBA
SOB COMPRESSÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, em formato de
artigo, como parte das exigências do Curso de
Engenharia Mecânica, para a obtenção do título
de Bacharel.

Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos
Orientador

Prof. Dr. Francisco Scinocca
Coorientador

LAVRAS – MG
2022

PAULA BEATRIZ MARTINS FONSECA

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DO ENDOCARPO DE FRUTOS DE MACAÚBA
SOB COMPRESSÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Lavras, em formato de artigo, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 31 de Agosto de 2022.

Prof. Dr. Dimas Jose Rua Orozco UFLA
Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos UFLA
Prof. Dr. Francisco Scinocca UFLA

Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos
Orientador

Prof. Dr. Francisco Scinocca
Co-Orientador

**LAVRAS – MG
2022**

Dedico a Deus e minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a meus intercessores, Nossa Senhora e Beato Padre Victor, por toda sabedoria, força e coragem que me trouxeram até este momento, por colocarem pessoas maravilhosas no meu caminho e por iluminar todos os dias da minha vida.

À minha família, por todo apoio, ajuda, compreensão, oração, carinho e amor. Amo vocês!

À minha irmã, que desde pequena me incentivava a estudar com suas aulas naquele pequeno quadro, sem você eu não chegaria até aqui.

Aos amigos que a UFLA me deu, agradeço por todo conhecimento compartilhado e pelo companheirismo nos momentos difíceis e de comemoração. Em especial, agradeço ao meu grande amigo Filipe, minha dupla desde 2016.

Às minhas amigas de república, Maica e Lara, obrigada por todo suporte e amizade durante todos esses anos, pelas noites do macarrão ao molho branco, que deixaram saudades!

Às minhas amigas, Taisa Maria, Maya e Bethânia, sou muito grata pela amizade de vocês, por cada conselho, cada risada, pelo apoio e por todos os momentos que passamos juntas.

Aos colegas, clientes e amigos USIMINAS. Obrigada por todos ensinamentos e companheirismo nos desafios profissionais e pessoais.

Ao meu orientador, professor Fábio Lúcio Santos, pela orientação, amizade e exemplo de profissionalismo durante todos esses anos. Obrigada por todo ensinamento e paciência.

Ao professor Francisco Scinocca pela dedicação, disposição e coorientação.

À Universidade Federal de Lavras pela oportunidade de realização do curso e por todas as portas abertas.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela oportunidade de realizar esta pesquisa e auxílio com a concessão de bolsas.

Por fim, a todos que de alguma forma colaboraram com a realização deste trabalho, agradeço imensamente.

Palavras são, na minha nada humilde opinião, nossa inesgotável fonte de magia.
(Alvo Dumbledore)

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma do processo para levantamento das propriedades estudadas. . .	14
Figura 2.2 – Fluxograma das análises estatísticas.	14
Figura 2.3 – Macaúba após o beneficiamento com a representação dos eixos de aferição. . .	15
Figura 2.4 – Raios de curvatura do fruto na região de contato “produto-placa compressora”, usados na determinação dos “módulos proporcionais de deformidade”. . .	17
Figura 2.5 – Mensuração dos raios de curvatura para a Macaúba do acesso A1, com taxa de deformação 15 mm/min na segunda repetição.	18
Figura 2.6 – Máquina de ensaio universal mecânico de bancada da Série EMIC 23.	18
Figura 3.1 – <i>Box Plot</i> representando as medianas das forças de ruptura por acessos e taxa de deformação em função da mediana e amplitude para os três acessos estudados em função das taxas de deformação.	25
Figura 3.2 – Apresentação das medianas dos módulos proporcionais de deformidade na ruptura do endocarpo dos frutos de macaúba para os três acessos estudados em função das taxas de deformação.	27
Figura 3.3 – <i>Box Plot</i> da força de ruptura média de acordo com os acessos.	28
Figura 3.4 – <i>Box Plot</i> da força de ruptura média de acordo com os acessos.	29
Figura 3.5 – <i>Box Plot</i> da taxa de deformação de acordo com força de ruptura média.	30
Figura 3.6 – <i>Box Plot</i> dos valores médios do módulo proporcional de deformidade na ruptura segundo os acessos.	31
Figura 3.7 – <i>Box Plot</i> dos valores médios do módulo proporcional de deformidade na ruptura conforme as taxas de deformação.	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Identificação dos frutos.	15
Tabela 3.1 – Resultados para a esfericidade média do endocarpo do fruto da macaúba para os acessos estudados.	21
Tabela 3.2 – Valores médios dos raios de curvatura R_1 e r_1 , obtidos por meio de ajustes de circunferências às curvaturas do corpo.	22
Tabela 3.3 – Apresentação dos dados para teste de Shapiro Wilk ($p > 0,05$), variável força de ruptura.	23
Tabela 3.4 – Apresentação dos dados para teste de Shapiro Wilk ($p > 0,05$), variável módulo proporcional de deformidade na ruptura.	24
Tabela 3.5 – Média e desvio padrão da força de ruptura entre acessos e taxas de deformação.	24
Tabela 3.6 – Média e desvio padrão do módulo proporcional de deformidade na ruptura entre acessos e taxas de deformação.	26
Tabela 3.7 – Resultados da análise de variância para a força de ruptura e módulo proporcional de deformidade do endocarpo da macaúba na ruptura, para os fatores acesso e taxa de deformação.	28
Tabela 3.8 – Valores das diferenças entre as médias de força de ruptura para cada grupo de acessos.	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	MATERIAL E MÉTODOS	14
2.1	Abordagem experimental	15
2.2	Análise estatística	19
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4	CONCLUSÃO	32
	REFERÊNCIAS	33

RESUMO

A macaúba [*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Martius] tem despertado significativo interesse como matéria-prima na produção de biocombustíveis, devido ao alto teor de óleo encontrado no seu fruto, além de ser uma planta perene, nativa e encontrada em diversos biomas do território brasileiro. Sua exploração, ainda ocorre de forma extrativista e pouco se sabe sobre suas propriedades mecânicas. Considerando a necessidade de se desenvolver novas tecnologias para viabilizar comercialmente a macaúba para produtores agrícolas, deve-se investir no desenvolvimento de sistemas de produção de mudas, colheita e processamento de frutos. Na produção de mudas, as sementes têm sido extraídas manualmente, entende-se que a automação desse processo pode aumentar a eficiência e qualidade das sementes. O desenvolvimento de máquinas e sistemas eficientes para a colheita, pós-colheita e processamento irá demandar o conhecimento das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-raquis-ráquila, bem como o conhecimento das propriedades modais (frequências naturais e modos de vibração) e dinâmicas do sistema. Dessa forma, considerando a importância da cultura da macaúba para o setor agroenergético brasileiro e a falta de tecnologias para a cadeia produtiva da cultura, realizou-se testes de compressão usando taxas de deformação entre 5 mm/min a 40 mm/min, aumentando 5 mm/min, considerando seis repetições para três acessos, chamados de A1, A2 e A3, provenientes dos municípios de Minas Gerais de Abaeté, Alvinópolis e Araxá, respectivamente, visando realizar o levantamento das propriedades mecânicas do endocarpo da macaúba, como força de ruptura e módulo proporcional de deformidade. A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que os valores médios para a força de ruptura do endocarpo da macaúba variaram para o acesso A1 de $4215,67 \pm 1740,46$ N a $5120,67 \pm 759,45$ N, para o acesso A2 de $3588,17 \pm 353,43$ N a $4135,83 \pm 369,43$ N, e para o acesso A3 houve variação de $5162,50 \pm 679,66$ N a $6094,83 \pm 673,50$ N. Para o módulo proporcional de deformidade na ruptura do endocarpo, os valores médios no acesso A3 variam de 656 ± 252 MPa a 988 ± 47 MPa, para o acesso A2 a variação foi de 735 ± 165 MPa a 985 ± 397 MPa e para o acesso A1 de 808 ± 147 MPa a 1070 ± 346 MPa. Para a variável resposta força de ruptura, verificou-se que apenas o fator acesso apresentou diferença significativa, com nível de significância de 5% de probabilidade, indicando variabilidade nos dados, e para o fator taxa de deformação, não foram observadas diferenças significativas em relação às variáveis resposta, o que proporcionará equipamentos que irão abranger a alta dispersão da macaúba.

Palavras-chave: Macaúba. Endocarpo. Módulo de deformidade.

ABSTRACT

The macaw palm [*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Martius] has aroused significant interest as a raw material in the production of biofuels, due to the high oil content found in its fruit, in addition to being a perennial plant, native and found in several biomes of the Brazilian territory. Its exploitation still occurs in an extractive way and little is known about its mechanical properties. Considering the need to develop new technologies to make macaw palm commercially viable for agricultural producers, it is necessary to invest in the development of seedling production, harvesting and fruit processing systems. In the production of seedlings, the seeds have been extracted manually, it is understood that the automation of this process can increase the efficiency and quality of the seeds. The development of efficient machines and systems for harvesting, post-harvesting and processing will demand knowledge of the geometric, physical and mechanical properties of the fruit-rachis-rachilla system, as well as knowledge of modal properties (natural frequencies and vibration modes) and system dynamics. Thus, considering the importance of macaw palm culture for the Brazilian agro-energy sector and the lack of technologies for the production chain of the culture, compression tests were carried out using strain rates between 5 mm/min to 40 mm/min, increasing 5 mm/min, considering six repetitions for three accessions, called A1, A2 and A3, from the municipalities of Minas Gerais of Abaeté, Alvinópolis and Araxá, respectively, aiming to carry out a survey of their mechanical properties of the endocarp of macaw palm, such as breaking force and proportional modulus of deformity. From the results obtained, it can be observed that the average values for the breaking force of the macaw palm endocarp varied for access A1 from 4215.67 ± 1740.46 N to 5120.67 ± 759.45 N, for access A2 there was variation from 3588.17 ± 353.43 N to 4135.83 ± 369.43 N, and for the A3 accession values between 5162.50 ± 679.66 N to 6094.83 ± 673.50 N were obtained. proportional modulus of deformity at endocarp rupture, mean values were obtained for access A3 ranging from 656 ± 252 MPa to 988 ± 47 MPa, for access A2 the variation was from 735 ± 165 MPa to 985 ± 397 MPa and for access A1 from 808 ± 147 MPa to 1070 ± 346 MPa. For the rupture force response variable, it was found that only the access factor showed a significant difference, with a significance level of 5% probability, indicating variability in the data, and for the strain rate factor, no significant differences were observed in relation to the response variables, which will provide equipment that will cover the high dispersion of macaw palm.

Keywords: Macaw palm. Endocarp. Deformity module.

1 INTRODUÇÃO

A macaúba, de nome científico *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Martius, pertencente à família Arecaceae, é uma palmeira frutífera, tipicamente brasileira, facilmente reconhecida por apresentar copa plumosa e acúleos em quase toda sua extensão, com ampla distribuição no continente americano. No Brasil, há ocorrência nas regiões nortes, sudeste e centro-oeste, onde ocupa amplas áreas de Cerrado a Mata Atlântica, sendo considerada a palmeira de maior dispersão no país (GONZALES et al., 1995; MONTROYA et al., 2016; MOURA et al., 2009; TELES et al., 2009).

Scariot, Lleras e Hay (1991), descrevem o fruto da macaúba como globoso ¹, com mesocarpo ² fibroso e mucilaginoso que recobre o endocarpo ³ de cor preta, lenhoso e rígido, protegendo uma semente oleaginosa, raramente duas ou três, de cor branca, recoberta por uma fina camada de tegumento.

Dentre as características da macaúba, vale ressaltar a alta produtividade de óleo sem toxinas, estimada em 5.000 kg de óleo por hectare, a geração de coprodutos de alto valor agregado, como farelo proteico, e o endocarpo que apresenta alta densidade energética, grande concentração de lignina e carbono fixo e baixa concentração de cinzas, assim como tem despertado interesse socioeconômico por sua importância ambiental no sequestro de carbono e recuperação de áreas degradadas (EVARISTO et al., 2016; MOTA et al., 2011; PIMENTEL, 2012).

Vislumbra-se que nos próximos anos, esta espécie terá grande impacto na economia nacional, com perspectivas de expansão de sua área cultivada, o que certamente demandará protocolos de propagação *in vitro* disponíveis e eficientes. Assim como o desenvolvimento de novas tecnologias para torná-la comercialmente rentável aos produtores agrícolas, havendo a necessidade de processos e máquinas para colheita e beneficiamento do fruto, visto que as sementes têm sido extraídas manualmente. Dessa forma, a automação desse processo pode aumentar a eficiência, qualidade das sementes e facilitar a exploração intensiva (BANDEIRA et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2016; VILLAR et al., 2016; VILLAR et al., 2021).

Lopes (2017) menciona que a exploração econômica da macaúba está passando do sistema extrativista para sistema de produção. No entanto, apesar do crescente interesse pela espécie, a instalação de lavouras comerciais convive com dificuldades na quebra de dormên-

¹ Com forma esférica ou de globo (FERRI; MENEZES, 1981).

² Denominada popularmente como polpa (SANTOS; COSTA; SANTOS, 2018).

³ Parede interna do fruto que envolve a semente (ANDREATA; TRAVASSOS, 1994).

cia da semente e no baixo crescimento inicial (MONTROYA et al., 2016; MOTTA et al., 2002; URBANETZ et al., 2016).

O princípio de vibração mecânica pode ser utilizado como opção para o processo de retirada do fruto da ráquila, análogo a outras frutas, como café, pinho, azeitona e cítricos (GRUPIONI et al., 2020; VILLAR et al., 2021). Velloso et al. (2017) caracterizaram o sistema fruto-ráquila de macaúba como subamortecido, através de ensaios de tração e vibração, a fim de embasar projetos de máquinas para colheita por vibração mecânica. Grupioni et al. (2020) elaboraram um sistema semimecanizado para colheita do fruto, onde um protótipo foi construído utilizando o *design* adaptado de uma colheitadeira por vibração de café e considerando a morfologia do cacho da macaúba.

Motoike et al. (2007) desenvolveram um processo de germinação e produção de sementes pré-germinadas de palmeiras do gênero *acrococmia*, que resulta em germinação de sementes entre 60% e 80%, o que possibilitou o estabelecimento de plantios comerciais desta cultura no Brasil (SOUZA, 2013).

Para o processamento dos frutos da macaúba, Villar et al. (2016) citam que existem máquinas comerciais que foram adaptadas para o despulpamento, o rompimento do endocarpo e extração do óleo do mesocarpo e semente, porém, essas adaptações não foram avaliadas para processos específicos para macaúba, não sendo considerado a heterogeneidade nas características do fruto.

Informações sobre as propriedades mecânicas dos produtos agrícolas são essenciais para o desenvolvimento de novos equipamentos que alcancem a máxima eficiência sem comprometer a qualidade final, principalmente na especificação de cargas que ele pode suportar de maneira segura, ou de cargas que determinadas máquinas deverão exercer sobre o produto. Dentre essas propriedades evidenciam-se os módulos de elasticidade e de deformidade do material, onde o módulo de deformidade é tido como mais significativo que o módulo de elasticidade, pois quando um produto é comprimido, a deformação total é que tem aplicação prática e permite que se realizem comparações de resistência relativa entre os diversos materiais (COUTO et al., 2002; RESENDE et al., 2007; RUFFATO et al., 2001).

Oliveira et al. (2016) evidenciam que com o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas será possível aperfeiçoar processos industriais e dimensionar adequadamente máquinas e equipamentos que serão utilizados nas operações de colheita e pós-colheita da macaúba, possibilitando a redução de mão de obra e os custos de produção.

Couto et al. (2002) ressaltam que o experimento mais simples para se medir a resposta mecânica de um material é o teste de compressão uniaxial, através do qual uma força, gradualmente crescente, é aplicada pela placa compressora no material, enquanto os dados de força de deformação são registrados durante a compressão.

Ruffato et al. (2001) citam os estudos realizados por Hertz, em 1896, que propôs uma solução para a determinação das tensões durante o contato de dois corpos convexos, elásticos e isotrópicos, pressionados um contra o outro. Hertz supôs que as áreas de contato são elípticas, e que cada corpo pode ser considerado como um sólido elástico semi-infinito carregado sob uma pequena área elíptica na superfície (KÖHN, 2019). Conforme a engenharia progrediu, novos estudos resultaram em melhorias na teoria Hertziana, eliminando diversas restrições impostas nas condições de Hertz, como a necessidade de as superfícies serem livres de atrito e perfeitamente elásticas (JOHNSON, 1987).

Para um corpo convexo comprimido entre duas placas paralelas, Couto et al. (2002) em seus estudos com o fruto de café, propõem que os dados de “força de deformação”, provenientes dos testes de compressão do material, podem ser usados com o método de Hertz, para determinar um módulo de deformidade do produto utilizando a deformação total (soma da elástica e plástica), considerando a existência de planos de simetria, possibilitando que os raios de curvatura do produto em contato com a placa superior possam ser considerados iguais àqueles do material em contato com a placa inferior.

Neto et al. (2013) determinaram o módulo proporcional de deformidade de frutos de abóbora nos valores da força máxima de compressão para deformações fixas. Os resultados indicam que tanto a força de compressão necessária, como o módulo proporcional de deformidade, aumentaram com a maturação, atingindo força máxima de 1.778 N e módulo de deformidade máxima de 164 MPa, após 30 dias.

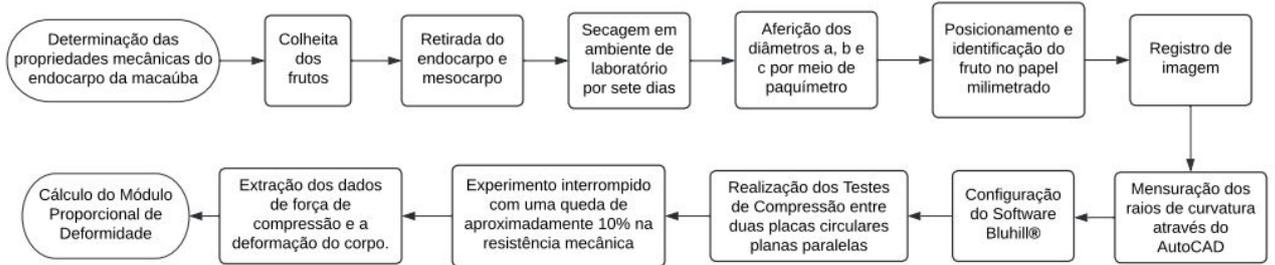
Resende et al. (2007) verificaram a influência do teor de água nos valores da força máxima de compressão para deformações fixas e determinaram o módulo proporcional de deformidade de grãos de feijão submetidos a compressão em três diferentes posições. Os resultados indicam que a força de compressão necessária para deformar o feijão diminui com o aumento do teor de água, e o módulo proporcional de deformidade aumenta com a redução do teor de água e da deformação do produto, obtendo-se valores entre 17 MPa a 713 MPa. Resultados semelhantes foram observados por Fernandes et al. (2014) e Oliveira, Resende e Devilla (2017) para trigo e frutos de baru, respectivamente.

Mediante o exposto, objetivou-se consolidar uma base de conhecimentos para o desenvolvimento de sistemas mecanizados, voltados para a extração da semente de macaúba do endocarpo, visando uma exploração em escala industrial através do princípio de ruptura do endocarpo por esforços de compressão, da determinação da força de ruptura do endocarpo da macaúba e do módulo de deformidade do endocarpo por meio do método de Hertz.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 2.1 apresenta o fluxograma do processo realizado para a determinação da força de ruptura e o módulo proporcional de deformidade, em detalhes no tópico 2.1 desta seção.

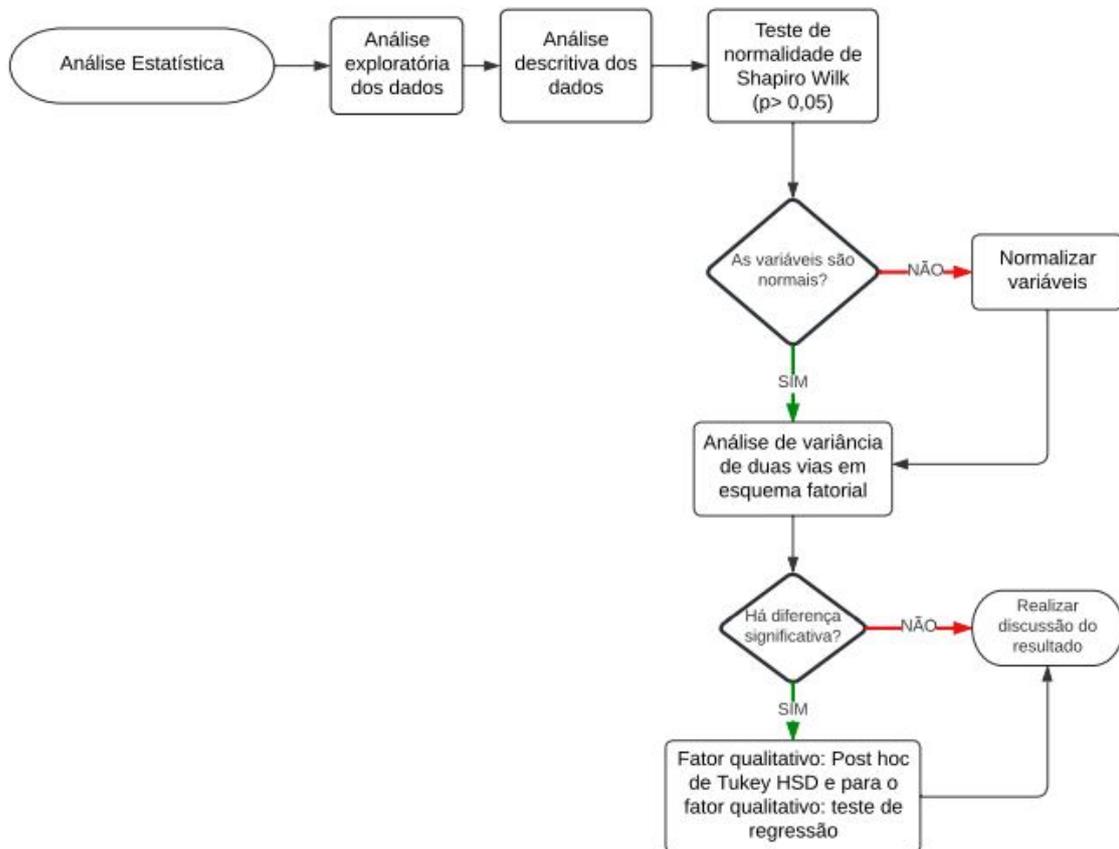
Figura 2.1 – Fluxograma do processo para levantamento das propriedades estudadas.



Fonte: Da autora.

Após a aquisição dos dados, os mesmos foram submetidos a análise estatística. A Figura 2.2 apresenta o fluxograma desta análise, detalhada no tópico 2.2 desta seção.

Figura 2.2 – Fluxograma das análises estatísticas.



Fonte: Da autora.

2.1 Abordagem experimental

Objetivando-se abranger uma possível variação entre as propriedades mecânicas a serem estudadas, força de ruptura e o módulo proporcional de deformidade, utilizaram-se frutos de três diferentes regiões do estado de Minas Gerais, Martinho Campos em Abaeté, Rio Piracicaba em Alvinópolis e Ibiá em Araxá, contendo os biomas Cerrado e Mata Atlântica. Os frutos são oriundos do Banco de Germoplasma da Universidade Federal de Viçosa (MG) e estão apresentados na Tabela 2.1.

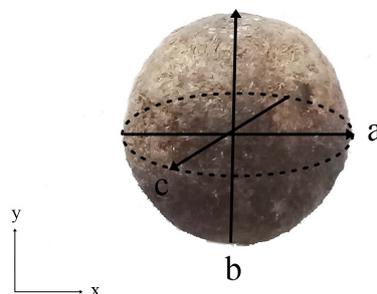
Tabela 2.1 – Identificação dos frutos.

Acesso e Identificação	BGP 16-6 A1	BGP 52-2 A2	BGP 12-7 A3
Quantidade de Frutos	67	67	58
Município / Estado	Abaeté / MG	Alvinópolis / MG	Araxá / MG
Região	Martinho Campos	Rio Piracicaba	Ibiá
Bioma	Cerrado	Mata Atlântica	Cerrado

Fonte: Adaptado de Biomas (2019).

Realizou-se o beneficiamento dos frutos no Laboratório do Núcleo de Estudos em Plantas Oleaginosas, Óleos Vegetais, Gorduras e Biocombustíveis na Universidade Federal de Lavras (MG), onde foi retirado todo seu epicarpo e mesocarpo mecanicamente. Após a secagem dos frutos por sete dias ao ar livre, realizada no Laboratório de Vibrações Mecânica, no complexo de engenharia da Universidade Federal de Lavras (MG), foram aferidos os diâmetros a, b e c segundo os eixos x, y e z, respectivamente, a partir da posição de repouso do fruto, por meio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, conforme ilustrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Macaúba após o beneficiamento com a representação dos eixos de aferição.



Fonte: Da autora.

Por ser um fruto aparentemente esférico, a esfericidade, S , pode ser apontada como uma propriedade de interesse no projeto de máquinas para a macaúba. Segundo Mohsenin (1986), o

grau de esfericidade de um corpo pode ser estimado pela razão entre o diâmetro de uma esfera, com o mesmo volume do corpo, e o diâmetro da menor esfera circunscrita no corpo ou, em geral, a maior dimensão do objeto, utilizando a Equação 2.1, onde a, b e c são os diâmetros da macaúba em x, y e z, respectivamente.

$$S(\%) = \frac{(abc)^{\frac{1}{3}}}{a} \times 100 \quad (2.1)$$

Os dados de esfericidade dos endocarpos do fruto da macaúba foram submetidos ao teste estatístico de análise de variância, segundo delineamento inteiramente causalizado, com três tratamentos utilizando os acessos A1, A2 e A3, considerando o nível de significância de 5% de probabilidade. A fim de avaliar a influência dos acessos estudados, apresentados na Tabela 2.1, para as médias de esfericidade do endocarpo, foi realizado o teste de Diferença Significativa de Tukey, com nível de significância de 5% de probabilidade.

Para determinar um módulo de elasticidade aparente, E, Engineers (1983) apresenta a Equação 2.2.

$$E = \frac{0,531F(1 - \mu^2)}{D^{3/2}} \left[\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{1/3} + \left(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{R_2} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (2.2)$$

em que F é força (N), D é a deformação elástica do corpo em ambos os pontos de contato (com as placas superior e inferior) (m), μ é a razão de Poisson e r_1 , R_1 , r_2 e R_2 são os raios de curvatura do corpo convexo nos pontos de contato (m), apresentados na Figura 2.4.

Couto et al. (2002) ressaltam que se pode obter um módulo de deformidade do produto pela Equação 2.2, contudo, 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, e em relação ao 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.

Para a determinação do módulo de deformidade em cada situação investigada, Couto et al. (2002) consideraram a existência de planos de simetria nos frutos de café, possibilitando que os raios de curvatura do produto em contato com a placa superior possam ser considerados iguais àqueles do material em contato com a placa inferior. Assim, a Equação 2.2 foi simplificada e expressa na Equação 2.3.

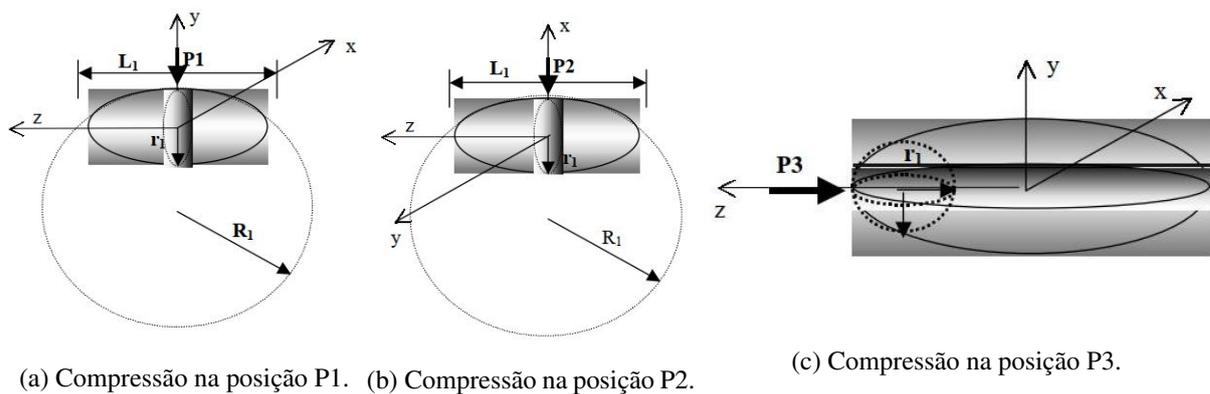
$$E = \frac{0,531F(1-\mu^2)}{D^{3/2}} \left[2 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (2.3)$$

Porém, nota-se que o módulo de deformidade depende da razão de Poisson, μ , cujo valor é desconhecido para frutos de café, desta forma, Couto et al. (2002) criaram uma variável, E' , proporcional ao módulo de deformidade, mencionada no texto como “módulo proporcional de deformidade”, definida na Equação 2.4.

$$E' = \frac{E}{1-\mu^2} = \frac{0,531F}{D^{3/2}} \left[2 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (2.4)$$

Por meio da Equação 2.4, Couto et al. (2002) utilizaram os dados provenientes das curvas de compressão força-deformação específica, transformados em força-deformação para a obtenção de módulos proporcionais de deformidade e para a obtenção dos raios de curvaturas r_1 e R_1 do corpo nos pontos de contato, para cada posição de compressão, foi utilizado um ajuste de circunferências às curvaturas do corpo, segundo os planos coordenados relevantes a cada posição de compressão, como mostrado nas Figuras 2.4a, 2.4b e 2.4c, onde o fruto de café foi considerado um elipsoide, com dimensões principais iguais aos valores médios das dimensões, determinados experimentalmente para cada eixo de compressão.

Figura 2.4 – 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.

(c) Compressão na posição P3.

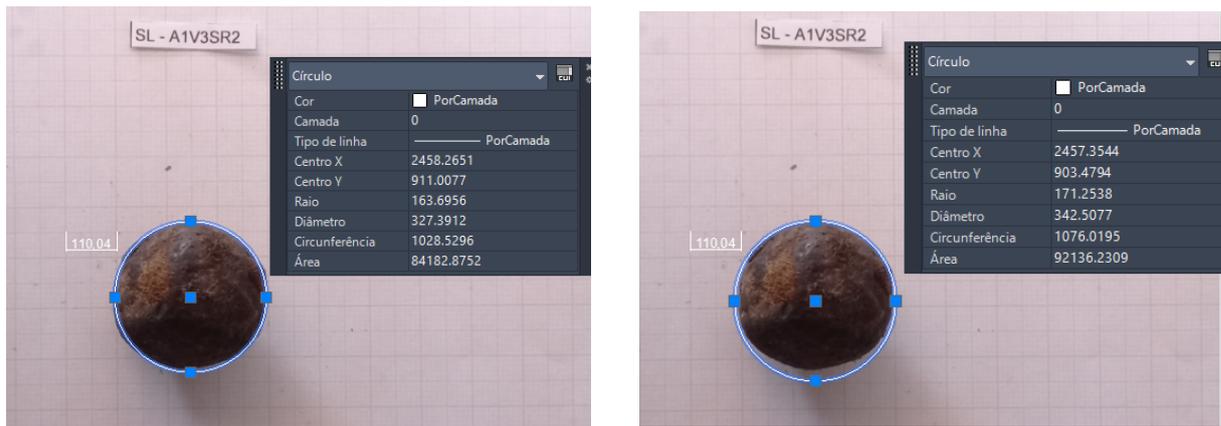
Fonte: (COUTO et al., 2002)

Para a determinação dos raios de curvatura, R_1 e r_1 , foram necessários a utilização de um suporte para a câmera, de onde foram registrados imagens de todos os frutos, devidamente identificados sobre um papel milimetrado, antes da realização dos ensaios.

Os valores dos raios de curvatura do corpo nos pontos de contato, independentemente da velocidade de compressão, foram obtidos por meio de ajustes de circunferências às curva-

turas do corpo, segundo os planos coordenados relevantes à posição de compressão P1, como realizado por Couto et al. (2002) na Figura 2.4a. Utilizou-se o Software AutoCAD, onde se traçou um círculo ao redor da macaúba a fim de obter o diâmetro do fruto, aferiu-se o valor do milímetro no papel milimetrado e dividiu-se ambos para obter o valor dos raios em milímetros, conforme apresentado na Figura 2.5a para r_1 e na Figura 2.5 para R_1 .

Figura 2.5 – Mensuração dos raios de curvatura para a Macaúba do acesso A1, com taxa de deformação 15 mm/min na segunda repetição.



(a) Mensuração do r_1 .

(b) Mensuração do R_1 .

Fonte: Da autora.

Para a realização dos ensaios de compressão, utilizou-se a máquina de ensaio universal mecânico de bancada da Série EMIC 23 da marca Instron®, modelo EMIC 23-20, localizada no Laboratório de Vibrações Mecânica, no complexo de engenharia da Universidade Federal de Lavras (MG), apresentada na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Máquina de ensaio universal mecânico de bancada da Série EMIC 23.



Fonte: Da autora.

As amostras foram submetidas a uma carga de compressão entre duas placas circulares planas paralelas, conforme apresentado na Figura 2.4a. Aplicou-se uma deformação constante de pequena magnitude nas duas faces opostas do fruto da macaúba. Os experimentos foram conduzidos usando taxas de deformação entre 5 mm/min a 40 mm/min, aumentando 5 mm/min, considerando sete repetições para os três acessos, e monitorado por meio do Software Bluehill®, para um ensaio de compressão de um corpo amorfo entre placas paralelas, com célula de carga da marca Instron® de 20kN, gerenciado pelo computador acoplado à máquina universal de testes.

Para não danificar as amêndoas, o experimento foi interrompido automaticamente, assim que houve uma queda de aproximadamente 10% na resistência mecânica, sendo esta carga suficiente para quebrar apenas o endocarpo. Esta configuração foi obtida em testes preliminares de *setup*, sem danificar as amêndoas da presente pesquisa. A partir dos ensaios de compressão realizados, foram coletadas importantes propriedades mecânicas do endocarpo da macaúba até a ruptura do endocarpo, tais como força de ruptura e deformação. A fim de extrair os dados de força de compressão e a deformação do corpo, para a realização do cálculo do módulo proporcionais de deformidade (E'), através da Equação 2.4, determinou-se seis deformações, 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 1,0 mm e a deformação de ruptura, que variou para cada amostra. Essas informações servirão de guia para o projeto de máquinas, visando o processo de produção de mudas em larga escala.

2.2 Análise estatística

Primeiramente, realizou-se uma análise exploratória dos dados. Optou-se por retirar uma repetição, em cada taxa de deformação, que apresentaram falhas, como a macaúba escorregar e girar durante a compressão. Desta forma, analisou-se 144 ensaios, sendo seis repetições em cada taxa de deformação estudada nos três acessos.

Na sequência, os dados das propriedades mecânicas do endocarpo da macaúba, referentes à força de ruptura e o módulo proporcional de deformidade calculado, foram submetidos a uma análise descritiva dos dados, realizada por meio da média, desvio padrão e representação gráfica.

Para avaliar a normalidade dos grupos, realizou-se o teste de Shapiro Wilk ($p > 0,05$). Riboldi et al. (2014) citam que as pressuposições, como a normalidade em modelos lineares,

têm vários objetivos, mas essencialmente visam facilitar a interpretação dos resultados, tornar as técnicas estatísticas mais simples e possibilitar testes de hipóteses.

A fim de avaliar a possível diferença entre as taxas de deformação e os acessos em relação à força de ruptura e módulo proporcional de deformidade na ruptura, os dados foram submetidos ao teste estatístico de análise de variância de duas vias em esquema fatorial, segundo delineamento inteiramente casualizado, em que os fatores foram acesso (A1, A2 e A3) e taxa de deformação (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 mm/min), tendo como variáveis resposta a força de ruptura e o módulo proporcional de deformidade na ruptura. As médias do fator qualitativo foram comparadas pelo *Post hoc* de Tukey HSD e para o fator qualitativo utilizou-se teste de regressão, para um nível de significância de 5% de probabilidade. As análises foram realizadas utilizando o software R (R Core Team, 2022).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3.1 são apresentados os resultados para a esfericidade média, S , do endocarpo do fruto da macaúba para os acessos estudados com os desvios padrões.

Tabela 3.1 – Resultados para a esfericidade média do endocarpo do fruto da macaúba para os acessos estudados.

Acessos	Esfericidade Média (%)	Desvio Padrão (%)
A1	91 a	1.48
A2	88 b	1.27
A3	89 c	1.46

As médias seguidas da mesma letra, na coluna, não apresentam diferença significativa conforme o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Da autora.

Considerando a média, a maior esfericidade foi obtida para o A1, somente 1,5% maior que a esfericidade média obtida para o acesso A3 e 3,5% maior que o acesso A2, que apresentou o menor valor médio entre os acessos observados. Apesar da baixa variação percentual, houve diferenças significativas entre os acessos para a esfericidade do endocarpo.

Os resultados encontrados, corroboram com os estudos realizados por Lima et al. (2016) que apresentaram valores de esfericidade próximos aos observados, de 91,1% e 87,3% considerando diferentes métodos de despulpa da macaúba e por Carvalho et al. (2010) que encontraram valores de 98,96% e 99,79% para diferentes teores de água estudados para macaúba.

Araujo et al. (2014) citam que valores de esfericidade abaixo de 80%, evidencia incapacidade de classificação de produtos agrícolas como esféricos. Deste modo, para os valores médios observados, a macaúba pode ser considerada esférica, o que, no âmbito de projetos de máquinas, deve ser considerado, pois pode ocasionar seu escorregamento no processo de compressão para a quebra do fruto.

As médias dos raios de curvatura do corpo, R_1 e r_1 , estão apresentadas na Tabela 3.2, juntamente os desvios padrões. Pode-se observar que o acesso A3 apresenta as maiores médias para os raios de curvatura, sendo 16,8% maior que o valor médio de R_1 e 15,6% maior para o valor médio de r_1 .

Nota-se que os valores de R_1 e r_1 são muito próximos para todos os acessos (Tabela 2.1). A maior variação encontrada foi de 3,18% entre R_1 e r_1 no acesso A1, e a menor foi de 1,88% no acesso A3. Isso pode ser explicado pela alta esfericidade apresentada pela macaúba, diferentemente do que acontece com o café, considerado um elipsoide nos estudos de Couto et

Tabela 3.2 – Valores médios dos raios de curvatura R_1 e r_1 , obtidos por meio de ajustes de circunferências às curvaturas do corpo.

Acesso	Raio	Raio _{med} (cm)	Desvio Padrão (cm)
A1	R_1	1,3809	0,0688
	r_1	1,4262	0,0914
A2	R_1	1,5189	0,0447
	r_1	1,5497	0,0717
A3	R_1	1,6586	0,0542
	r_1	1,6904	0,0626

Fonte: Da autora.

al. (2002), apresentando valores dos raios de curvatura de 6,6 mm para R_1 e de 6,6 mm e 8,3 mm para r_1 para frutos “cereja”, tendo variação entre os valores de 20,48%, e para os frutos "verde" obtiveram valores de R_1 e r_1 iguais a 6,2 mm e 8,9 mm, respectivamente, com variação de 30,33% entre os valores.

Para realização das análises estatísticas, primeiramente aplicou-se o teste de Shapiro Wilk ($p > 0,05$) a fim de avaliar a normalidade das variáveis força de ruptura e módulo proporcional de deformidade na ruptura. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 3.3 e 3.4, respectivamente.

Para a variável força de ruptura, apenas para a taxa de deformação 15 mm/min no acesso A1, em destaque na Tabela 3.3, a variável não foi considerada normal ($W=0,728$; $p < 0,05$).

Para a variável módulo proporcional de deformidade ruptura, na taxa de deformação 5 mm/min, no acesso A3, a variável não foi considerada normal ($W=0,743$; $p < 0,05$) e na taxa de deformação 30 mm/min, no acesso A2, também não houve normalidade para a variável ($W=0,709$; $p < 0,05$), ambas encontram-se em destaque na Tabela 3.4.

Como poucos dados apresentaram não normalidade, optou-se por desconsiderar as não normalidades encontradas e considerar todo o conjunto de dados como normal. Em seguida, os dados referentes à força de ruptura e o módulo proporcional de deformidade na ruptura foram submetidos a uma análise descritiva dos dados.

Na Tabela 3.5 são apresentados os valores médios para as forças requeridas para a ruptura do endocarpo dos frutos de macaúba e os seus respectivos desvios padrões para os três acessos estudados e as taxas de deformação impostas.

Os valores médios para a força de ruptura do endocarpo da macaúba variaram para o acesso A1 de $4215,67 \pm 1740,46$ N a $5120,67 \pm 759,45$ N, para o acesso A2 há variação

Tabela 3.3 – Apresentação dos dados para teste de Shapiro Wilk ($p > 0,05$), variável força de ruptura.

Taxa de deformação	Acesso	Shapiro Wilk	p
5 mm/min	A1	0.9075484	0.4204650
	A2	0.8436264	0.1396608
	A3	0.9516836	0.7538933
10 mm/min	A1	0.8085084	0.0700047
	A2	0.9655086	0.8610189
	A3	0.9046990	0.4024497
15 mm/min	A1	0.7288090	0.0122601
	A2	0.8499595	0.1572870
	A3	0.8735002	0.1572870
20 mm/min	A1	0.8797947	0.2681158
	A2	0.9060331	0.4108172
	A3	0.9207279	0.5106193
25 mm/min	A1	0.9405447	0.6635910
	A2	0.9021146	0.3865800
	A3	0.8535519	0.1681172
30 mm/min	A1	0.8901131	0.3187807
	A2	0.9224265	0.5230065
	A3	0.9198169	0.5040428
35 mm/min	A1	0.8204775	0.0890959
	A2	0.8448899	0.1430333
	A3	0.9323199	0.5981327
40 mm/min	A1	0.9257965	0.5480535
	A2	0.9873065	0.9815939
	A3	0.9322569	0.5976403

Fonte: Da autora.

de $3588,17 \pm 353,43$ N a $4135,83 \pm 369,43$ N, e para o acesso A3 encontram-se valores entre $5162,50 \pm 679,66$ N a $6094,83 \pm 673,50$ N.

Essa grande variação nos valores médios também pode ser observada em outros estudos com materiais biológicos, como o de Ribeiro et al. (2007), em seu trabalho sobre grãos de soja submetidos a compressão em diferentes posições, em que a força média variou entre 302,72 a 72,5 N; 127,64 a 41,19 N e 110,86 a 21,72 N, para as posições P1, P2 e P3, respectivamente; em função do teor de água. Resende et al. (2007) em um estudo semelhante para grãos de feijão submetidos a compressão, relatam que a força média em função do teor de água variou entre 22,3 a 551,7 N; 10,5 a 253,1 N e 11,6 a 143 N, para as posições P1, P2 e P3, respectivamente. Oliveira, Resende e Devilla (2017) descrevem em seus estudos sobre os frutos de baru, valores de força de compressão média variando de 8,09 a 1516,37 N, de 7,19 a 1672,25 N e de 5,06 a

Tabela 3.4 – Apresentação dos dados para teste de Shapiro Wilk ($p > 0,05$), variável módulo proporcional de deformidade na ruptura.

Taxa de deformação	Acesso	Shapiro Wilk	p
5 mm/min	A1	0.9280856	0.5654009
	A2	0.9667983	0.8702781
	A3	0.7431549	0.0170586
10 mm/min	A1	0.9607573	0.8255577
	A2	0.9607573	0.2666484
	A3	0.9167956	0.4825867
15 mm/min	A1	0.8192634	0.0869659
	A2	0.9373612	0.6380169
	A3	0.9604505	0.8232058
20 mm/min	A1	0.9646985	0.8551153
	A2	0.8987109	0.3663662
	A3	0.8752806	0.2480772
25 mm/min	A1	0.8219243	0.0916954
	A2	0.8852255	0.2939219
	A3	0.9296671	0.5775337
30 mm/min	A1	0.9010777	0.3803395
	A2	0.7086623	0.0076178
	A3	0.9409573	0.6669220
35 mm/min	A1	0.9157454	0.4752580
	A2	0.8809128	0.2732753
	A3	0.9748086	0.9230365
40 mm/min	A1	0.7945396	0.0524582
	A2	0.9655687	0.8614542
	A3	0.8876000	0.3058030

Fonte: Da autora.

Tabela 3.5 – Média e desvio padrão da força de ruptura entre acessos e taxas de deformação.

Taxa de deformação (mm/min)	Acessos					
	A1		A2		A3	
	Média (N)	Desvio padrão (N)	Média (N)	Desvio padrão (N)	Média (N)	Desvio padrão (N)
5	5008,83	830,70	4135,83	369,43	5355,17	493,08
10	5120,67	759,45	4077,33	342,94	5951,17	562,47
15	4763,50	1007,02	3975,83	430,55	5162,50	679,66
20	4291,00	1740,46	3800,17	438,66	6094,83	673,50
25	4215,67	383,26	3852,33	859,10	5545,50	254,97
30	4696,17	898,49	3970,83	353,21	5548,67	792,96
35	4492,83	1092,01	3991,67	607,20	5446,17	844,76
40	5118,17	368,29	3588,17	353,43	5217,50	954,75

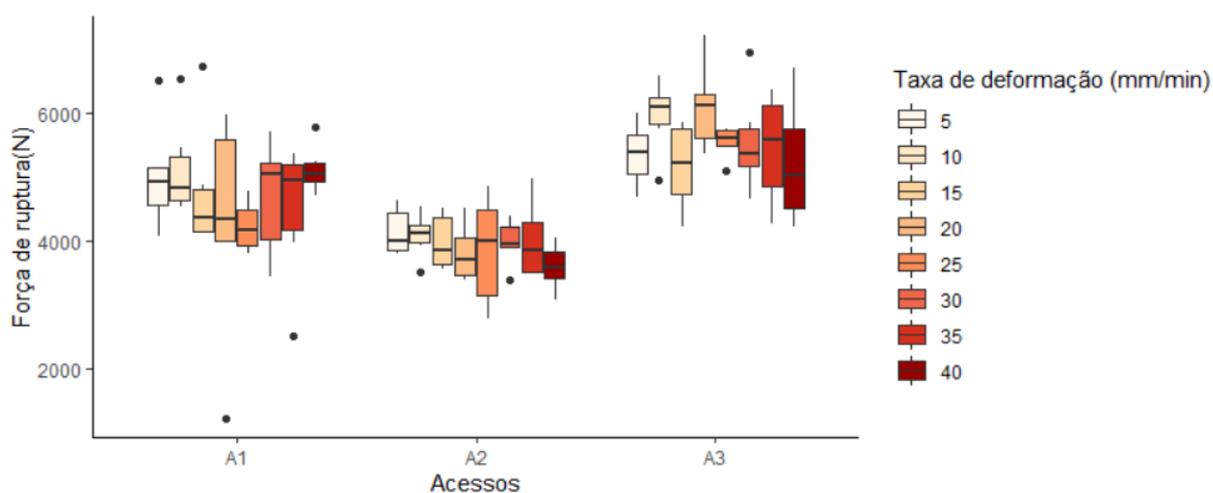
Fonte: Da autora.

605,33 C para 60, 80 e 100° C, respectivamente, concluindo que a redução do teor de umidade aumentou a força necessária para deformar a fruta.

Observa-se que para os frutos de macaúba, a força de ruptura média obtida possui valores muito altos ao comparado com os obtidos para frutos de baru, soja e feijão, isso pode ser explicado pelo fato do endocarpo da macaúba ser muito rígido e espesso e rico em lignina (SCARIOT; LLERAS; HAY, 1991; SOUSA, 2020).

Na Figura 3.1 é apresentado um *Box Plot* da força de ruptura média por acesso e taxa de deformação em torno da mediana e amplitude, para melhor visualização dos dados. Nota-se que as maiores médias de força de ruptura encontram-se no acesso A3 e que o acesso A2 apresentou-se mais frágil a compressão, tendo as menores forças de ruptura dentre os acessos, para todas as taxas de deformação.

Figura 3.1 – *Box Plot* representando as medianas das forças de ruptura por acessos e taxa de deformação em função da mediana e amplitude para os três acessos estudados em função das taxas de deformação.



Fonte: Da autora.

A partir da Tabela 3.5 e da Figura 3.1, pode-se observar uma grande dispersão dos valores, que possuem variação entre $3588,17 \pm 353,43$ N a $6094,83 \pm 673,50$ N, também nota-se a presença de *outliers*. Pino (2014) ressaltam que embora a presença de *outliers* possa resultar erro, eles também podem ser um resultado original, indicando um comportamento extremo da variável, que merece ser estudado, e não removido. Desse modo, optou-se por mantê-los para a realização da análise de variância.

Pela Figura 3.1 pode-se observar três grupos de medianas no acesso A1, sendo eles as taxas de deformação 5 e 10 mm/min, as taxas de deformação 15, 20 e 25 mm/min e as taxas

30, 35 e 40 mm/min. Já para o acesso A2, nota-se que as medianas das taxas de deformação 5, 25 e 30 mm/min são mais próximas, assim como para as taxas de deformação de 20 e 40 mm/min. Para o acesso A3, é possível observar que as medianas das taxas de deformação 10 e 20 mm/min são próximas, assim como para as taxas de deformação 25 e 35 mm/min, porém para as demais taxas, os dados possuem grandes variações.

Para as forças de ruptura do endocarpo, calcularam-se os módulos proporcionais de deformidade na ruptura. Na Tabela 3.6 são apresentados os valores médios dos módulos proporcionais de deformidade na ruptura do endocarpo dos frutos de macaúba e os seus respectivos desvios padrões para os três acessos estudados e para as taxas de deformação impostas.

Tabela 3.6 – Média e desvio padrão do módulo proporcional de deformidade na ruptura entre acessos e taxas de deformação.

Taxa de deformação (mm/min)	ACESSOS					
	A1		A2		A3	
	Média (Pa)	Desvio padrão (Pa)	Média (Pa)	Desvio padrão (Pa)	Média (Pa)	Desvio padrão (Pa)
5	9,31E+08	1,24E+08	9,57E+08	1,53E+08	9,88E+08	4,67E+07
10	9,72E+08	1,60E+08	9,04E+08	2,42E+08	6,56E+08	2,52E+08
15	1,07E+09	3,46E+08	8,82E+08	2,82E+08	8,08E+08	1,65E+08
20	8,83E+08	5,35E+08	9,85E+08	3,97E+08	9,16E+08	1,26E+08
25	9,45E+08	8,36E+07	8,63E+08	1,22E+08	9,23E+08	9,79E+07
30	8,82E+08	2,02E+08	7,35E+08	1,65E+08	8,74E+08	1,14E+08
35	8,79E+08	2,90E+08	9,19E+08	1,20E+08	9,62E+08	1,01E+08
40	8,08E+08	1,47E+08	8,18E+08	8,23E+07	7,88E+08	1,14E+08

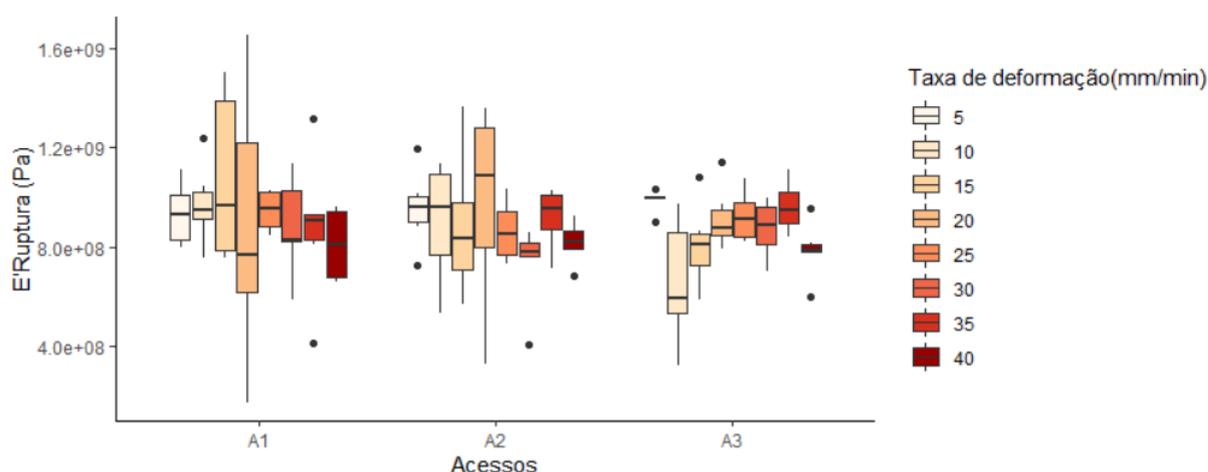
Fonte: Da autora.

Os valores médios para os módulos proporcionais de deformidade no acesso A3 variam de 656 ± 252 MPa a 988 ± 47 MPa, para o acesso A2 a variação é de 735 ± 165 MPa a 985 ± 397 MPa, e para o acesso A1 é de 808 ± 147 MPa a 1070 ± 346 MPa. Referidos valores estão coerentes com os observados por Resende et al. (2007) para grãos de feijão, que obtiveram valores variando entre 41 MPa a 713 MPa para a posição P1, 26 MPa a 564 MPa para a posição P2 e 17 MPa a 487 MPa para a posição P3 e relatam que o módulo proporcional de deformidade aumenta com a redução do teor de água e da deformação do produto. O que corrobora com Sousa et al. (2018) ao estudar as sementes de rabanete, Fernandes et al. (2014) para grãos de trigo, Oliveira, Resende e Devilla (2017) para frutos de baru que obtiveram o módulo proporcional de deformidade entre 1.100 MPa a 17200 MPa, 89 MPa a 512 MPa e 0,50 MPa a 34,46 MPa, respectivamente.

Neto et al. (2013) em seu trabalho sobre o comportamento mecânico de frutos de abóbora submetidos a compressão durante a maturação, constatam que o módulo de deformabilidade aumenta com o avanço do amadurecimento, atingindo um módulo máximo de 164 MPa, aos 30 dias e 132,09 MPa, aos 60 dias. Couto et al. (2002) descrevem os módulos de deformidade de frutos de café em diferentes estádios de maturação, em que apresentaram valores entre 10 MPa a 30 MPa para os frutos cereja e 70 MPa a 150 MPa para os frutos verdes.

Na Figura 3.2 é apresentado um *Box Plot* do módulo proporcional de deformidade na ruptura por acessos e taxa de deformação em torno da mediana e amplitude, para melhor visualização dos dados.

Figura 3.2 – Apresentação das medianas dos módulos proporcionais de deformidade na ruptura do endocarpo dos frutos de macaúba para os três acessos estudados em função das taxas de deformação.



Fonte: Da autora.

Também pode-se observar a variabilidade dos dados, como descrito para força de ruptura média. Ao analisar o *Box Plot*, verifica-se que para o acesso A1, tem-se as taxas de deformação 5, 10 e 15 mm/min com valores das medianas muito próximos. Para o acesso A2, a similaridade entre as medianas pode ser notada nas taxas de deformação 5, 10 e 35 mm/min e para as taxas de 25 e 40 mm/min. Já para o acesso A3, as taxas que apresentam semelhança entre as medianas são 20, 25 e 30 mm/min. Para as demais taxas de deformidade nota-se a dispersão dos dados em todos os acessos.

Na Tabela 3.7 são apresentados os resultados das análises de variância para as variáveis resposta, força de ruptura e módulo proporcional de deformidade do endocarpo da macaúba na ruptura, para os fatores acesso e taxa de deformação.

Tabela 3.7 – Resultados da análise de variância para a força de ruptura e modulo proporcional de deformidade do endocarpo da macaúba na ruptura, para os fatores acesso e taxa de deformação.

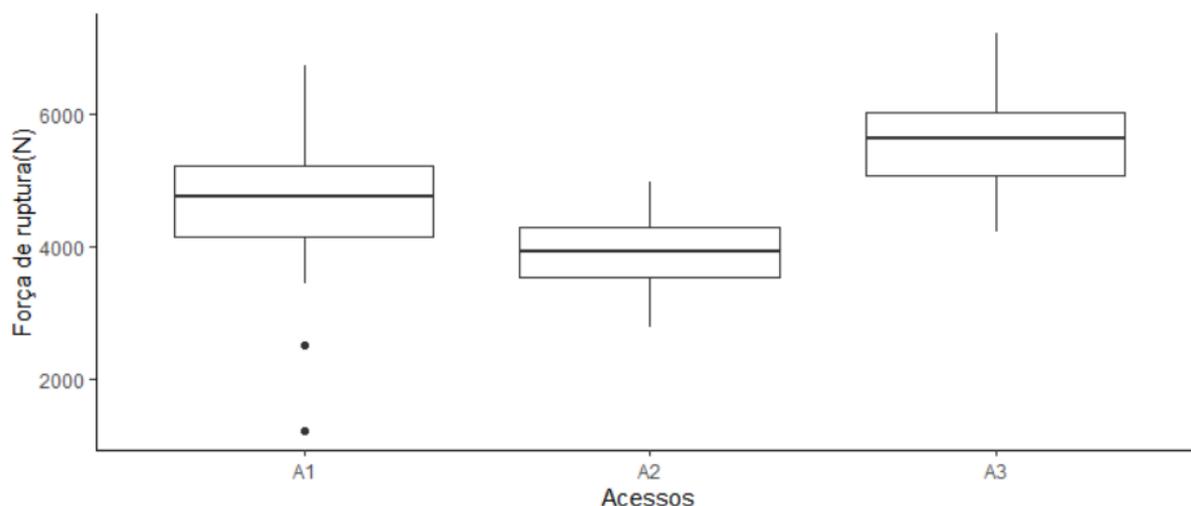
Fonte de Variação	Força de Ruptura	E' Ruptura
Acessos	F = 4.250574 P-valor = 0.0164609 *	F = 0.1006762 P-valor = 0.9043020
Taxa de Deformação	F = 1.375795 P-valor = 0.2216697	F = 0.7892520 P-valor = 0.5976434
Acessos*Taxa de Deformação	F = 1.037473 P-valor = 0.4216268	F = 0.9661486 P-valor = 0.4918255

* Estatisticamente significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Fonte: Da autora.

Para a variável resposta força de ruptura, verificou-se que apenas o fator acesso, em destaque na tabela a cima, apresentou diferença significativa, com nível de significância de 5% de probabilidade [F (2,120) =4,251; p = 0.0165]. Através do *Box Plot* apresentado na Figura 3.3, pode-se notar a dispersão dos valores.

Figura 3.3 – *Box Plot* da força de ruptura média de acordo com os acessos.



Fonte: Da autora.

Ao analisar a força de ruptura em relação os acessos, através do *Post hoc* de Tukey HSD, com nível de significância de 5% de probabilidade, apresentado na Tabela 3.8, observa-se que houve diferenças significativas da força de ruptura entre o grupo de acessos A2 e A1 ($p < 0,001$), entre o grupo A3 e A1 ($p < 0,001$), assim como o grupo A3 e A2 ($p < 0,001$). O acesso A3 apresentou a maior força média demandada para a ruptura do endocarpo, sendo 29% maior que a força de ruptura média do acesso A2.

Tabela 3.8 – Valores das diferenças entre as médias de força de ruptura para cada grupo de acessos.

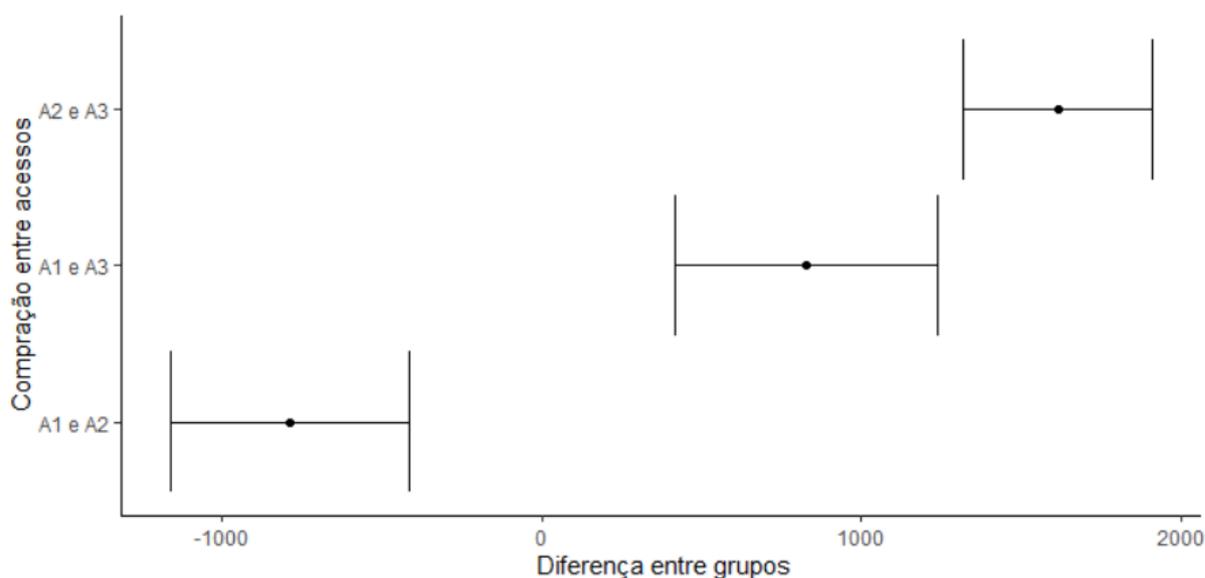
Acessos	Médias (N)	Grupos	Diferença entre médias	Intervalo de confiança		p-valor
				Limite inferior	Limite superior	
A1	4713,4058 b	A2 - A1	-789,3233	-1149,2115	-429,4351	<0,001
A2	3924,0825 c	A3 - A1	826,8087	466,9206	1186,6969	<0,001
A3	5540,2145 a	A3 - A2	1616,132	1256,2439	1976,0202	<0,001

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não apresentam diferença significativa conforme o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Da autora.

Pela Figura 3.4, pode-se observar que as diferenças entre as médias possuem intervalo de confiança variando de - 1161.6606 a 1912.429, o que indica que os dados estão muito dispersos. Essa variabilidade entre locais também foi observada em estudos relacionados a determinação das propriedades mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba (VILLAR et al., 2016; VELLOSO et al., 2017; RANGEL et al., 2020).

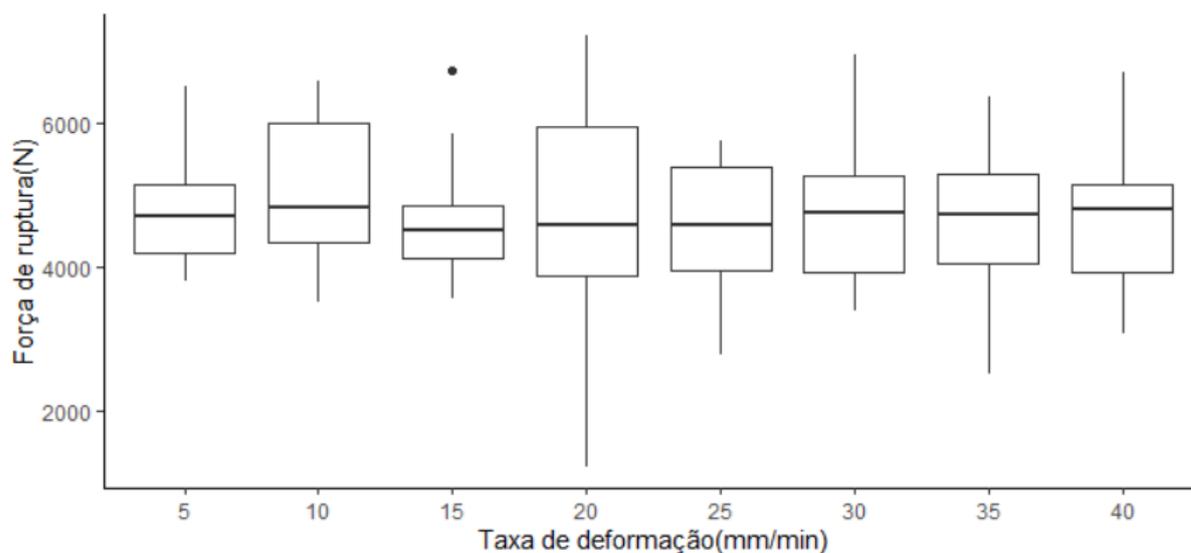
Figura 3.4 – *Box Plot* da força de ruptura média de acordo com os acessos.



Fonte: Da autora.

Ainda para a variável força de ruptura, o fator taxa de deformação não apresentou diferença significativa [$F(7,120) = 1,375$; $p = 0,221$], assim como a interação entre acessos e taxa de deformação [$F(14,120) = 1,03$; $p = 0,421$], como pode ser melhor visualizado pelo *Box Plot* apresentado na Figura 3.5, onde pode-se observar a proximidade entre as medianas para todas as taxas de deformação. Isso sugere que a taxa de deformação não influencia na resistência à ruptura do endocarpo.

Figura 3.5 – *Box Plot* da taxa de deformação de acordo com força de ruptura média.



Fonte: Da autora.

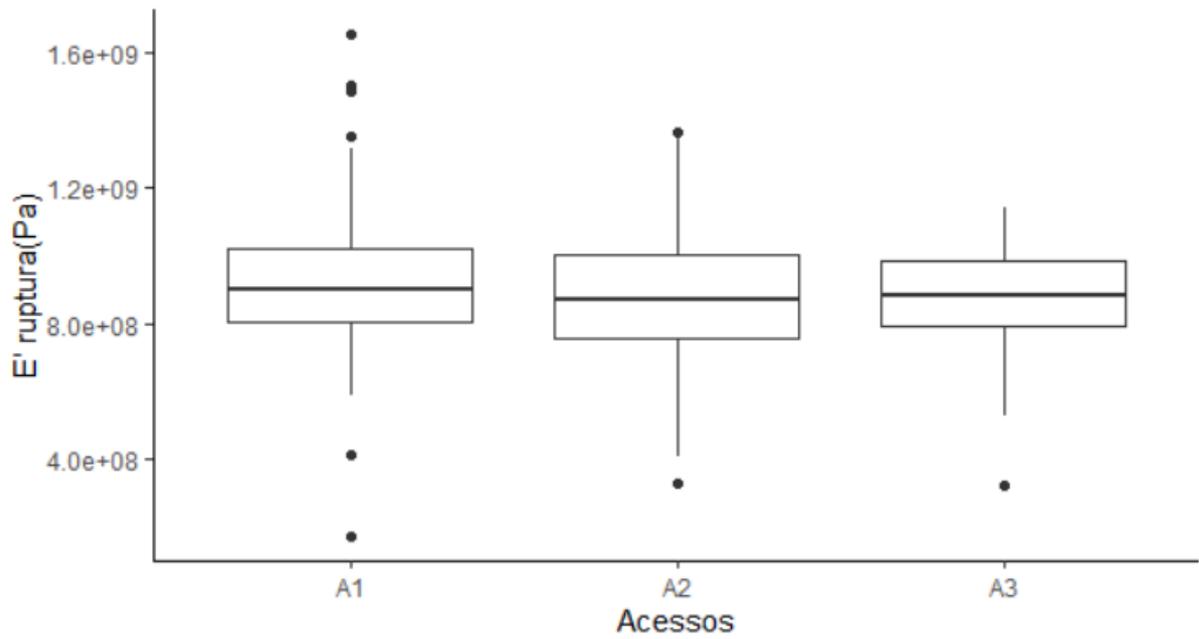
Para a variável módulo proporcional de deformidade na ruptura, verificou-se que não houve diferença significativa para o fator acesso [$F(2,120) = 0,100$; $p = 0,904$], e também para o fator taxa de deformação [$F(7,120) = 0,789$; $p = 0,597$], assim como para a interação entre estas variáveis [$F(14,120) = 0,966$; $p = 0,491$]. O que sugere que a taxa de deformação, assim como os acessos, não influenciam no módulo proporcional de deformidade na ruptura endocarpo.

Através da Figura 3.6 pode-se notar a similaridade das medianas entre o módulo proporcional de deformidade na ruptura em cada acesso. Por meio do *Box Plot* dos valores médios do módulo proporcional de deformidade na ruptura e as taxas de deformação, demonstrado na Figura 3.7, verifica-se que há uma pequena diferença nas medianas para todas as taxas de deformação, porém como foi constatado pela análise de variância essa diferença não é significativa.

Os resultados observados para o fator taxa de deformação para a força de ruptura e para o módulo proporcional de deformidade na ruptura, são desejáveis e indicam que o projeto de máquinas para ruptura do endocarpo pode ser concebido utilizando maiores taxas de deformação, o que resultaria em equipamentos com maior capacidade operacional.

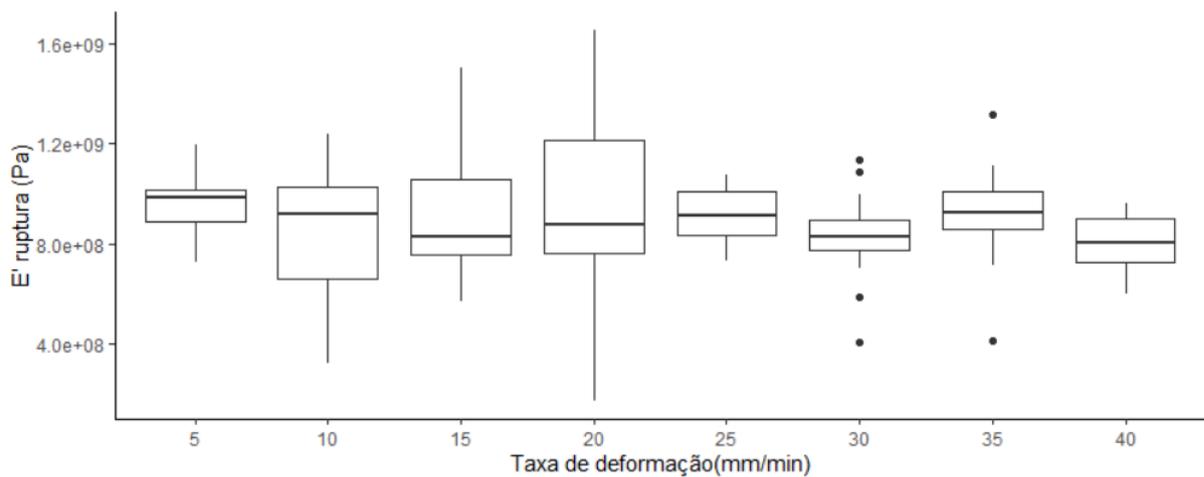
Pode-se inferir, que a não significância para o fator acesso em relação ao módulo proporcional de deformidade na ruptura, também é desejável para projetos de máquinas, visto a variabilidade encontrada entre os acessos, o que proporcionará equipamentos que irão abranger a alta dispersão da macaúba.

Figura 3.6 – *Box Plot* dos valores médios do módulo proporcional de deformidade na ruptura segundo os acessos.



Fonte: Da autora.

Figura 3.7 – *Box Plot* dos valores médios do módulo proporcional de deformidade na ruptura conforme as taxas de deformação.



Fonte: Da autora.

4 CONCLUSÃO

- A macaúba pode ser considerada um esferoide para os acessos estudados, pois apresenta esfericidades para os três acessos muito próximas a 1, o que no âmbito de projetos de máquinas deve ser considerado a fim de evitar o escorregamento da mesma no processo de compressão, ou, quebra do endocarpo.
- As taxas de deformação não influenciaram a força de ruptura e no módulo proporcional de deformidade do endocarpo na ruptura da macaúba durante os ensaios de compressão. Para o processo de mecanização para retirada do endocarpo para produção de mudas, a utilização de maiores taxas de deformação pode favorecer o projeto de máquinas com maior capacidade operacional. No entanto, houve diferenças significativas entre a força de ruptura e sua interação com os acessos, indicando variabilidade nos dados, evidenciando a importância de seu estudo no âmbito do projeto de máquinas para a extração de sementes.
- Não foram observadas diferenças significativas em relação ao módulo proporcional de deformidade na ruptura do endocarpo da macaúba em relação aos acessos, o que é desejável, visto a variabilidade encontrada entre os acessos, o que proporcionará equipamentos que irão abranger a alta dispersão da macaúba

REFERÊNCIAS

- ANDREATA, R. H. P.; TRAVASSOS, O. P. **Chaves para determinar famílias de: pteridophyta, gymnospermae, angiospermae.** [S.l.]: Editora Universitária Santa Ursula, 1994.
- BANDEIRA, F. S. et al. Cultivo in vitro e embriogênese somática de embriões zigóticos de macaúba (*acrocomia aculeata* (jacq). loddiges). Universidade Federal de Viçosa, 2008.
- BIOMAS, I. sistema marinho-costeiro do brasil: compatível com a escala 1: 250 000. **Rio de Janeiro: IBGE**, 2019.
- CARVALHO, F. M. d. et al. Influência da temperatura do ar de secagem e da utilização do ácido etilenodiaminotetracético na qualidade do óleo e caracterização do fruto de macaúba. Universidade Federal de Viçosa, 2010.
- COUTO, S. M. et al. Comportamento mecânico de frutos de café: módulo de deformidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 6, n. 2, p. 285–294, 2002.
- ENGINEERS, A. S. of A. **Agricultural engineers yearbook of standards.** [S.l.]: American Society of Agricultural Engineers, 1983.
- EVARISTO, A. B. et al. Harvest and post-harvest conditions influencing macauba (*acrocomia aculeata*) oil quality attributes. **Industrial Crops and Products**, Elsevier, v. 85, p. 63–73, 2016.
- FERNANDES, L. S. et al. Influência do teor de água nas propriedades mecânicas dos grãos de trigo submetidos à compressão. **Bioscience Journal**, Universidade Federal de Uberlândia, v. 30, n. 1, p. 219–223, 2014.
- FERRI, M. G.; MENEZES, N. L. de. **Glossário ilustrado de botânica.** [S.l.]: NBL Editora, 1981.
- GONZALES, R. B. et al. **Field guide to the palms of the Americas.** [S.l.]: Princeton University Press, 1995.
- GRUPIONI, C. M. de F. et al. Macaw palm supply chain: Evaluation of a semi-mechanized fruit harvesting system. **Industrial crops and products**, Elsevier, v. 151, p. 112444, 2020.
- JOHNSON, K. L. **Contact mechanics.** [S.l.]: Cambridge university press, 1987.
- KÖHN, A. O. Estudo analítico e numérico das tensões de hertz em contato entre uma esfera/plano e um cilindro/plano. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2019.
- LIMA, G. N. et al. Extração mecânica de endosperma de macaúba para fins de germinação. Universidade Federal de Viçosa, 2016.
- LOPES, F. d. A. Desenvolvimento de mudas de macaúba em função do tamanho do recipiente e idade da muda na fase de viveiro. Universidade Federal de Viçosa, 2017.
- MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials. 2nd revised and updated edition.** [S.l.]: Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1986.

- MONTOYA, S. G. et al. Fruit development, growth, and stored reserves in macauba palm (*acrocomia aculeata*), an alternative bioenergy crop. **Planta**, Springer, v. 244, n. 4, p. 927–938, 2016.
- MOTA, C. S. et al. Exploração sustentável da macaúba para produção de biodiesel: colheita, pós-colheita e qualidade dos frutos. **Informe Agropecuário**, v. 32, n. 265, p. 41–50, 2011.
- MOTOIKE, S. et al. Processo de germinação e produção de sementes pré-germinadas de palmeiras do gênero *acrocomia*. **Revista da Propriedade Industrial PI0703180-7**, 2007.
- MOTTA, P. E. F. d. et al. Ocorrência da macaúba em minas gerais: relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, SciELO Brasil, v. 37, n. 7, p. 1023–1031, 2002.
- MOURA, E. F. et al. Somatic embryogenesis in macaw palm (*acrocomia aculeata*) from zygotic embryos. **Scientia Horticulturae**, Elsevier, v. 119, n. 4, p. 447–454, 2009.
- NETO, A. F. et al. Mechanical behavior of pumpkin fruits subjected to compression during maturation. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, SciELO Brasil, v. 43, p. 223–231, 2013.
- OLIVEIRA, D. E. C. de; RESENDE, O.; DEVILLA, I. A. Mechanical properties of baru fruit (*dipteryx alata vogel*). **Semina: Ciências Agrárias**, Universidade Estadual de Londrina, v. 38, n. 1, p. 185–196, 2017.
- OLIVEIRA, Z. R. C. R. d. et al. Propriedades físicas da ráquis da macaúba visando o projeto de máquinas agrícolas. Universidade Federal de Viçosa, 2016.
- PIMENTEL, L. D. Nutrição mineral da macaúba: bases para adubação e cultivo. Universidade Federal de Viçosa, 2012.
- PINO, F. A. A questão da não normalidade: Uma revisão. **Revista de economia agrícola**, v. 61, n. 2, p. 17–33, 2014.
- R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2022. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.
- RANGEL, J. P. et al. Dynamic behavior of the macauba palm (*acrocomia aculeata*) fruit-rachilla system using the stochastic finite element method. **Acta Scientiarum. Agronomy**, SciELO Brasil, v. 43, 2020.
- RESENDE, O. et al. Comportamento mecânico dos grãos de feijão submetidos a compressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 11, p. 404–409, 2007.
- RIBEIRO, D. M. et al. Propriedades mecânicas dos grãos de soja em função do teor de água. **Engenharia Agrícola**, SciELO Brasil, v. 27, p. 493–500, 2007.
- RIBOLDI, J. et al. Precisão e poder de testes de homocedasticidade paramétricos e não-paramétricos avaliados por simulação. **Revista Brasileira de Biomedicina**, v. 32, n. 3, p. 334–344, 2014.
- RUFFATO, S. et al. Efeito da velocidade de compressão e da presença de pedúnculo no módulo de deformidade de frutos de café. 2001.

SANTOS, A. M.; COSTA, P.; SANTOS, F. **Glossário ilustrado de botânica: Subsídio para aplicação no ensino**. [S.l.]: São Paulo: Edições Hipótese, 2018.

SCARIOT, A. O.; LLERAS, E.; HAY, J. D. Reproductive biology of the palm *acrocomia aculeata* in central brazil. **Biotropica**, JSTOR, p. 12–22, 1991.

SOUSA, K. A. d. et al. Mechanical properties of raphanus sativus l. seeds. **Revista Ciência Agrônômica**, SciELO Brasil, v. 49, p. 437–442, 2018.

SOUSA, L. V. M. d. Caracterização energética da macaúba (*acrocomia aculeata*). 2020.

SOUZA, P. P. d. Desenvolvimento de tecnologia de avaliação de vigor e para o armazenamento de sementes de macaúba (*acrocomia aculeata* (jacq.) lodd. ex. mart). Universidade Federal de Viçosa, 2013.

TELES, H. d. F. et al. Caracterização de ambientes com ocorrência natural *acrocomia aculeata* (jacq.) lodd. ex mart e suas populações nas regiões centro e sul do estado de goiás. Universidade Federal de Goiás, 2009.

URBANETZ, C. et al. Protocolos de superação de dormência física e condicionamento de sementes de bocaiuva para pequenos produtores. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2016., 2016.

VELLOSO, N. S. et al. Mechanical properties of the macaw palm fruit-rachilla system. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, SciELO Brasil, v. 47, p. 218–225, 2017.

VILLAR, F. M. d. M. et al. Elasticity modulus and damping ratio of macaw palm rachillas. **Ciência Rural**, SciELO Brasil, v. 47, 2016.

VILLAR, F. M. d. M. et al. Modal properties of fruit-rachilla system of the macaw palm. **Plos one**, Public Library of Science San Francisco, CA USA, v. 16, n. 1, p. e0237291, 2021.