



**ENIO DE ARAÚJO CARVALHO**

**PROTOCOLO PARA DIGITALIZAÇÃO E  
MODELAGEM DE CAFEIRO PARA FINS DE  
SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

**LAVRAS – MG**

**2016**

**ENIO DE ARAÚJO CARVALHO**

**PROTOCOLO PARA DIGITALIZAÇÃO E MODELAGEM DE  
CAFEIRO PARA FINS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Mecanização Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães

Orientador

**LAVRAS – MG**

**2016**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Carvalho, Enio de Araújo.

Protocolo para digitalização e modelagem de cafeeiro para fins de  
simulação numérica / Enio de Araújo Carvalho. – Lavras : UFLA,  
2016.

114 p. : il.

Dissertação(mestrado acadêmico)–Universidade Federal de  
Lavras, 2016.

Orientador: Ricardo Rodrigues Magalhães.

Bibliografia.

1. Digitalização Tridimensional. 2. Modelagem Computacional.  
3. Simulação numérica. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

**ENIO DE ARAÚJO CARVALHO**

**PROTOCOLO PARA DIGITALIZAÇÃO E MODELAGEM DE  
CAFEIEIRO PARA FINS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Mecanização Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 23 de março de 2016.

Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos UFLA

Prof. Dr. Domingos Sarvio Magalhães Valente UFV

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães  
Orientador

**LAVRAS – MG**

**2016**

*Dedico esta dissertação à minha família.*

## **AGRADECIMENTOS**

A toda a minha família, por confiar em mim.

Ao meu orientador, Prof. Ricardo Rodrigues Magalhães, pelo apoio e ajuda na realização do trabalho.

À aluna de iniciação científica, Flávia Rocha Andrade, pela participação no projeto.

Agradeço à Profa. Ana Paula Piovisan Melchiori pelas explicações e receptividade, e aos seus alunos de iniciação científica: Wellyton Marcos e Elias Castro.

Ao Prof. Roberto Alves Braga Júnior pela compreensão.

Ao Prof. Paulo Ricardo Gherardi Hein pelas instruções.

E aos demais professores do Departamento de Engenharia Agrícola e da Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Lavras - UFLA.

## RESUMO GERAL

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo computacional tridimensional de um cafeeiro (*Coffea arabica* L.) e realizar testes experimentais de simulação numérica via Método dos Elementos Finitos (MEF). Com base no modelo computacional tridimensional de uma árvore cafeeira, o projeto foi desenvolvido aplicando-se modelagens computacionais e simulações numéricas. Para isto, um modelo computacional tridimensional, representativo da estrutura morfológica de um cafeeiro adulto, foi obtido. Procedeu-se ao escaneamento da estrutura lenhosa de sustentação de folhas e frutos, formada pelo tronco principal ou ortotrópico e as ramificações plagiotrópicas de um cafeeiro da Cultivar Catuaí Vermelho IAC 144, com idade de 8 anos, coletado como amostra, em uma propriedade rural, localizada no município de Nepomuceno-MG. Como resultado principal desta pesquisa, desenvolveu-se um protocolo de digitalização e modelagem de cafeeiro para fins de simulação numérica via MEF. Com isto, este trabalho poderá contribuir para o direcionamento de novas pesquisas científicas, na área e no desenvolvimento de novas tecnologias, para os sistemas mecânicos de colheita de café, beneficiando de forma direta o setor industrial e o meio agrícola.

**Palavras-chave:** Digitalização Tridimensional. Modelagem Computacional. Simulação numérica.

## GENERAL ABSTRACT

The objective of this work was to develop a three-dimensional computer model of a coffee plant (*Coffea Arabica* L.) and conduct numerical simulation experimental tests via Finite Element Method (FEM). The project was developed based on the three-dimensional computer model of a coffee tree, applying computer modeling and numerical simulations. To this end, we obtained a three-dimensional computer model representative of the morphological structure of structure of an adult coffee plant. Subsequently, we scanned the wood structure sustaining leaves and fruits, formed by the main, or orthotropic, trunk and plagiotropic ramifications of a coffee plant of cultivar Catuaí Vermelho IAC 144, with eight years of age, sampled from a rural property located in the municipality of Nepomuceno, Minas Gerais, Brazil. As main result of this research, a protocol for digitalization and modeling of coffee plants was developed for numeric simulation via FEM. This work can contribute in directing new scientific researches for this area and in developing new technologies for mechanical harvest systems, directly benefiting the industrial sector and the agricultural medium.

**Keywords:** Three-dimensional Digitalization. Computer Modeling. Numerical Simulation.

## LISTA DE FIGURAS

### PRIMEIRA PARTE

Figura 1 - Lavoura Cafeeira.....	28
Figura 2 - Planta de Café e Inserção do 1º par de ramos. ....	29
Figura 3 - Dimensões da planta cafeeira.....	30
Figura 4 - Planta de Café: Poda e Desfolha. ....	32
Figura 5 - Materiais utilizados nos ensaios. ....	33
Figura 6 - Partes seccionadas da planta de café. ....	34
Figura 7 - Procedimento de Digitalização, fase de testes. ....	35
Figura 8 - Amostra inicial e sua digitalização 3D arquivo (WRL).....	37
Figura 9 - Amostra inicial digitalização 3D (WRL) e imagem no Blender. ....	38
Figura 10 - Imagem digitalizada do aparelho Scanner (arquivo wrl). ....	38
Figura 11 - Amostras iniciais de teste e suas digitalizações no software Blender. ....	39
Figura 12 - Modelo Tridimensional da amostra inicial do tronco cafeeiro.....	40
Figura 13 - Modelo tridimensional renderizado da amostra inicial do tronco cafeeiro.....	41
Figura 14 - Conversão de arquivos.....	42
Figura 15 - Junção das partes do tronco cafeeiro de amostras para testes. ....	43
Figura 16 - Junção das partes do tronco de amostras para testes. ....	44
Figura 17 - Amostras da 1º planta de teste e suas digitalizações no software Blender. ....	45
Figura 18 - União de amostras da 1º planta de testes. ....	46
Figura 19 - Vértices da linha de bordadura da extremidade do tronco cafeeiro. ....	46
Figura 20 - Ramificações extrudadas da superfície do tronco cafeeiro. ....	47

Figura 21 - Exemplo da inserção de uma amostra de testes do tronco cafeeiro. ....	48
Figura 22 - Exemplo de uma amostra de testes do tronco cafeeiro com inserção. ....	48
Figura 23 - Ramificação plagiotrópica utilizada na modelagem. ....	49
Figura 24 - Ramificação plagiotrópica modelada. ....	49
Figura 25 - Ramificação Plagiotrópica utilizada como molde na modelagem. ....	50
Figura 26 - Montagem das partes seccionadas ou amostras do tronco cafeeiro. ....	51
Figura 27 - Modela virtual do tronco cafeeiro ortotrópico. ....	52
Figura 28 - Modelo virtual do ramo plagiotrópico do cafeeiro. ....	52
Figura 29 - Modelo Computacional da estrutura lenhosa da árvore cafeeira. ....	53
Figura 30 - Modelo computacional da árvore cafeeira. ....	54
Figura 31 - Modelo geométrico da árvore cafeeira. ....	55
Figura 32 - Modelo tridimensional da árvore cafeeira. ....	55
Figura 33 - Diagrama da estrutura de atividades. ....	57
Figura 34 - Balança de precisão com amostra de tronco cafeeiro. ....	58
Figura 35 - Câmera de secagem com amostras de tronco cafeeiro. ....	58
Figura 36 - Cuba de Vácuo contendo amostra de tronco cafeeiro. ....	60
Figura 37 - Balança de precisão e becker com água destilada, com amostra do tronco cafeeiro. ....	61
Figura 38 - Máquina Universal de Ensaio “LOS”. ....	63
Figura 39 - Corpo-de-prova B. ....	64
Figura 40 - Gráfico Tensão x Deformação Específica. ....	64
Figura 41 - Setup dos testes de compressão na máquina universal de ensaios. ....	67

Figura 42 - Corpo-de-prova B, face B11 .....	68
Figura 43 - Corpo-de-prova B, face B22. ....	68
Figura 44 - Imagem da amostra do tronco cafeeiro ImageJ.....	69
Figura 45 - Biblioteca do SolidWorks2013. ....	71
Figura 46 - Modelo Tridimensional da árvore cafeeira, SolidWorks2013. ....	72
Figura 47 - Malha geométrica de simulação no modelo computacional do cafeeiro .....	73
Figura 48 - Modelo Tridimensional da árvore cafeeira, SolidWorks2013. ....	74
Figura 49 - Modelo Computacional da estrutura lenhosa cafeeira, SolidWorks2013.....	74

## **SEGUNDA PARTE - ARTIGO**

Figure 1. Part of a trunk coffee plant under scanning process .....	89
Figure 2. Entire coffee plant geometry composed by scanned parts.....	90
Figure 3. Coffee wood plant sample (a) before and (b) after compression test ..	91
Figure 4. Archimedes immersion method for density determination.....	92
Figure 5. Scanned geometry of the coffee plant with clamping and loads .....	96
Figure 6. Experimental procedure adopted for validation of simulations .....	97
Figure 7. Coffee tree branches numbering .....	98
Figure 8. Convergence analysis from a branch #1 .....	99
Figure 9. Remeshed branche for simulations.....	100
Figure 10. Stress–strain curve from a coffee plant sample.....	101
Figure 11. Simulated displacements in the branch #1 (0.5 N).....	102
Figure 12. Simulated displacements in the branch #1 (1.0 N).....	103
Figure 13. Experimental vs. simulated (FEA) results for the load of 0.5 N .....	104
Figure 14. Experimental vs. simulated (FEA) results for the load of 1 N .....	105

## LISTA DE TABELAS

### PRIMEIRA PARTE

Tabela 1 - Teor de água dos corpos-de-provas. ....	59
Tabela 2 - Massas dos Corpos-de-Prova. ....	62
Tabela 3 - Massa específica dos Corpos-de-prova.....	62
Tabela 4 - Tensão x Deformação Específica. ....	65
Tabela 5 - Módulo de Elasticidade.....	66
Tabela 6 - Limite de Escoamento. ....	66
Tabela 7 - Cálculo do Coeficiente de Poisson. ....	70
Tabela 8 - Coeficiente de Poisson. ....	70

### SEGUNDA PARTE - ARTIGO

Table 1. Mean and standard deviation from the coffee plant samples properties .....	101
--	-----

## **LISTA DE SIGLAS**

MEF	Método dos Elementos Finitos
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAE	Computer Aided Engineering
N	Newton, unidade de medida de força.
STL	Standard Template Library
WRL	Virtual Reality Modeling Language
SLDPRT	SolidWorks part
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
3D	Tridimensional ou três dimensões
UFLA	Universidade Federal de Lavras

## SUMÁRIO

	<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	15
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	17
<b>2.1</b>	<b>Digitalização Tridimensional</b> .....	17
<b>2.2</b>	<b>Modelagem e Simulação tridimensional</b> .....	19
<b>2.3</b>	<b>Método dos Elementos Finitos</b> .....	22
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	27
<b>3.1</b>	<b>Coleta de Amostras</b> .....	28
<b>3.1.1</b>	<b>Caracterização da área</b> .....	28
<b>3.1.2</b>	<b>Averiguação e Seleção dos Cafeeiros</b> .....	29
<b>3.1.3</b>	<b>Dados de Campo</b> .....	30
<b>3.1.4</b>	<b>Desfolha e Poda</b> .....	31
<b>3.1.5</b>	<b>Corte</b> .....	32
<b>3.1.6</b>	<b>Seccionamento e corte</b> .....	33
<b>3.1.7</b>	<b>Identificação e preparação</b> .....	34
<b>3.2</b>	<b>Modelagem Computacional e Digitalização das Amostras</b> .....	35
<b>3.2.1</b>	<b>Renderização dos modelos digitalizados</b> .....	39
<b>3.3</b>	<b>Desenvolvimento do Modelo Computacional</b> .....	43
<b>3.3.1</b>	<b>Junção dos modelos computacionais das amostras</b> .....	43
<b>3.3.2</b>	<b>Retopologia computacional</b> .....	46
<b>3.3.3</b>	<b>Montagem do Modelo Computacional</b> .....	50
<b>3.4</b>	<b>Determinação das propriedades físico-mecânicas da madeira do cafeeiro</b> .....	55
<b>3.4.1</b>	<b>Ensaio Laboratoriais</b> .....	57
<b>3.4.1.1</b>	<b>Teor de água da Madeira Cafeeira</b> .....	57
<b>3.4.1.2</b>	<b>Massa específica</b> .....	60
<b>3.4.2</b>	<b>Ensaio Mecânicos</b> .....	63
<b>3.4.2.1</b>	<b>Módulo de Elasticidade e Limite de escoamento</b> .....	63
<b>3.4.2.2</b>	<b>Coefficiente de Poisson</b> .....	67
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÕES NUMÉRICAS</b> .....	71
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	75
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	77
	<b>SEGUNDA PARTE – ARTIGO</b> .....	83
	<b>ARTIGO 1 - GEOMETRIC MODELING OF A COFFEE PLANT FOR DISPLACEMENTS PREDICTION</b> .....	83

## **PRIMEIRA PARTE**

### **1 INTRODUÇÃO**

No passado, a validação da solução de problemas na indústria era obtida, quase que em sua totalidade, por meio de testes experimentais. Atualmente, programas comerciais de simulação numérica vêm contribuindo, de maneira significativa, na redução destes testes e, conseqüentemente, reduzindo o tempo e custos no desenvolvimento de novos produtos.

Com o aumento na capacidade de processamento dos computadores, as simulações numéricas têm se tornado mais completas e com aplicações diversas, atingindo vários ramos da engenharia e outras áreas. Existem vários programas comerciais de análise numérica para este fim, que podem ser, via elementos finitos, com capacidade de simular falhas em componentes, amplamente utilizados na indústria e no meio acadêmico. Entretanto, estes programas são considerados de alto consumo de memória dos computadores, necessitando estações de trabalho específicas para este fim, além de exigir mão de obra qualificada, para a realização das simulações, o que dificulta sua utilização na indústria agrícola e outras áreas afins.

A utilização destes programas em novas aplicações, o aprimoramento dos modelos existentes, juntamente com a evolução constante dos computadores podem contribuir com a redução do tempo gasto em simulações numéricas, o que é de grande interesse tecnológico e científico.

Este projeto tem como finalidade a modelagem 3D de uma árvore cafeeira e, posteriormente, a realização de testes experimentais de simulação numérica de esforços, utilizando software computacional de análise de tensões via método dos elementos finitos (MEF).

O modelo computacional tridimensional da estrutura lenhosa da árvore cafeeira, desenvolvido neste projeto, com certa representatividade em relação à

amostra real do cafeeiro, para fins de predição do comportamento mecânico de cafeeiros, tem o intuito de viabilizar análises computacionais de sistemas mecânicos de colheita mais eficientes, bem como a otimização dos já existentes, com base nos esforços conhecidos na interação colhedora-máquina, durante a colheita mecanizada e semimecanizada.

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um protocolo de digitalização e modelagem computacional de cafeeiro para fins de simulação numérica.

Para isto, estabeleceram-se como objetivos específicos:

- a) Obter um modelo tridimensional da estrutura lenhosa da árvore cafeeira;
- b) Obter as propriedades físico-mecânicas da madeira cafeeira;
- c) Entender os princípios do comportamento mecânico de um cafeeiro durante a colheita.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Digitalização Tridimensional**

O processo de digitalização consiste na obtenção de informações de diversos pontos da superfície tridimensional de forma que estes possam ser reconstruídos por meio de uma linguagem computacional, permitindo, assim, a construção de uma amostra digital análoga (SILVA; TARALLI; MELZ, 2015).

A digitalização tridimensional tem por objetivo desenvolver modelos virtuais baseados em objetos que existem fisicamente. Visto que a necessidade de criação desses modelos podem ter causas variadas, essa técnica possui aplicações em diferentes áreas do conhecimento. Os avanços na área de computação gráfica e a possibilidade de realizar o desenho tridimensional via computador (sistemas CAD/CAM/CAE) impulsionaram esse desenvolvimento além do uso das técnicas de digitalização 3D. Com o uso das técnicas de digitalização, pode-se realizar a captação de informações de um objeto físico tridimensional, gerando, com isso, um arquivo digital do objeto digitalizado. Assim, esse objeto poderá ser visualizado, tridimensionalmente, alterado e processado com elevada rapidez e precisão (BERTOL, 2008).

A digitalização 3D teve seu surgimento associado a conhecimentos teóricos, relacionados às áreas de visão computacional, processamento de imagens, da geometrização e modelagem, da visualização e do desenvolvimento de sensores ópticos, de contato ou ultrassônicos (ALENCAR, 2010).

Segundo Freitas (2006), existem diversos sistemas de digitalização tridimensional, como, por exemplo: triangulação por Laser, triangulação por cores, radar Laser, tomografia, luz infravermelha com CCD linear e sensor conoscópico a laser, fotogrametria, scanner 3D.

A fotogrametria permite obter as coordenadas ou até mesmo um modelo tridimensional, com alta precisão, por meio de imagens que podem ser definidas

como sendo a reprodução de um determinado objeto por um sistema de lentes a partir de ondas luminosas obtidas por sensores (WALFORD, 2010).

Para Silva et al. (2010), o uso da Tecnologia de Digitalização Tridimensional por meio de um Scanner 3D Móvel, tem por objetivo capturar os dados in loco da superfície, permitindo, assim, desenvolver a construção ou reconstrução de objetos com características de modelos 3D virtuais. Essa técnica vem sendo aplicada, na indústria, em diversas áreas, tais como: desenvolvimento de produtos, construção de moldes, inspeção, controle de qualidade, dentre outras.

Os processos de digitalização podem ser divididos em sistemas com contato e sistemas sem contato. Segundo Ferreira (2003), no método de digitalização 3D a laser (sistema sem contato), há uma maior automação na aquisição de dados, pois este processo a laser é mais preciso e, geralmente, mais rápido, mas, oticamente, depende de alguns fatores, como opacidade e cor da superfície a ser escaneada. Seu uso é recomendado, para objetos com grandes quantidades de detalhes, independente de características como, por exemplo, a dureza, visto que não ocorre um contato entre o instrumento utilizado e a peça a ser digitalizada. Sokovic (2006) ressalta que esta forma de digitalização a laser é um método rápido e preciso, dessa forma, também, é possível digitalizar materiais com alta ductibilidade ou até mesmo líquidos.

De acordo com Silva, Taralli e Melz (2015), o procedimento de captura das informações consiste, primeiramente, em definir a área a ser capturada, possibilitando, assim, a aquisição de uma nuvem de pontos a qual é formada pelo conjunto de coordenadas em três dimensões (X,Y e Z), representando, assim, a superfície digitalizada. Com isso, informações, para a recuperação e reconstrução das estruturas em um sistema computacional, que utiliza software de processamento de imagens, são obtidas.

No processo digitalização de uma peça, são necessários alguns cuidados relacionados à superfície na qual ela se encontra. Esta peça deve ser, preferencialmente opaca, para evitar que ocorra o espalhamento da luz, e clara, para que se tenha diminuição, ao máximo, a absorção da luz que é incidida sobre o objeto. Outro fator importante é o ajuste da potência do laser para atingir uma situação ótima de reflexão da luz (SILVA, 2010).

Para a obtenção dos modelos 3D, o processamento é realizado com os dados da nuvem de pontos que foram adquiridos, a qual pode conter milhões de pontos. Com isso, um arquivo com estes dados pode conter demasiada informação para processamento em computadores convencionais. Assim, têm-se o uso dos sistemas CAD, para realizar a filtragem dos pontos presentes nessa nuvem, podendo ter uma redução considerável (geralmente mais de 50%). Essa filtragem irá manter somente os pontos significativos como forma de representação do objeto, ou seja, quanto menos detalhe tiver na superfície da peça, menor será a quantidade de pontos que são utilizados para representá-la. Com o uso dessa filtragem de pontos, verifica-se sua real importância, para a redução dos ruídos que estão presentes no processo de digitalização, assim como o desenvolvimento de modelos tridimensionais mais fáceis de manipular (SILVA, 2006).

## **2.2 Modelagem e Simulação tridimensional**

A modelagem computacional pode ser definida como sendo a representação computacional de uma ideia, um objeto, um evento, um processo ou sistema, ou seja, é a atividade humana de construir modelos no computador, utilizando recursos de representação e simplificação oferecidos pela máquina, objetivando alcançar algum benefício específico (OLIVEIRA, 2015). Um modelo computacional pode gerar resultados de forma otimizada, os quais levariam muito tempo para serem gerados por meio de cálculos manuais, isso se

deve ao alto poder computacional atual (OGBORN; MILLER, 1994). Algumas tecnologias, utilizadas na engenharia, são o CAD (computer-aided design) e o CAE (computer-aided engineering).

Computer aided design (CAD) é definido, segundo Callicott (2001), como um sistema computacional utilizado para a criação, modificação, análise ou otimização de projetos. Esses sistemas computacionais podem ser hardware e software que desempenham funções específicas requeridas pelos usuários. O hardware, que compõe o CAD, é, basicamente, composto por computador, placas gráficas e determinados equipamentos periféricos. Já os softwares CAD são constituídos por programas que realizam a implementação gráfica no sistema. Além disso, pode ser composto por outros programas como facilitador das funções de engenharia.

No final da década de 80, o desenvolvimento de pesquisas, envolvendo tecnologias para produção de determinados objetos, diretamente de um modelo tridimensional projetado no programa CAD, foi iniciado. Essas tecnologias foram chamadas de Prototipagem Rápida, pois realizavam a fabricação de objetos que visavam ao auxílio das equipes de engenharia na visualização, montagem e testes dos produtos. Com isso, houve um aumento do processo de desenvolvimento de produtos nesse sentido (OLIVEIRA, 2015).

De acordo com Carvalho e Volpato (2007), a prototipagem rápida é definida como um processo de fabricação pela adição de materiais, em forma de camadas planas, ou seja, sendo baseado em princípios de manufatura em camadas. Pode ser verificado que essa tecnologia permite a fabricação de componentes, que podem ser chamados de protótipos ou modelos, com características físicas em 3 dimensões, possuindo informações que são obtidas, diretamente, com base no modelo geométrico, que foi gerado no CAD, com alto poder de processamento, automatizado e com flexibilidade.

A prototipagem rápida de um produto é parte fundamental no seu processo de desenvolvimento do produto, pois possibilita uma análise de sua forma e funcionalidade que seja realizada numa fase anterior à produção do produto definitivo. Essas representações físicas de produtos (protótipos) vêm sendo utilizadas, desde a antiguidade, sendo muito utilizadas, para o desenvolvimento de protótipos virtuais, nos anos 80. Isso se deu, principalmente, com a disseminação dos sistemas CAD tridimensionais (CARVALHO; VOLPATO, 2007).

Ainda, no processo de Prototipagem Rápida, a primeira etapa é a obtenção da representação tridimensional, do objeto a ser gerado, com um sistema tridimensional ou de algum software CAD. O arquivo gerado nessa atividade possui formato STL (Standard Template Library), o qual representa uma determinada malha triangular. Após a obtenção do arquivo STL, o modelo 3D gerado é enviado para o sistema CAM, geralmente específico para determinado processo ou máquina, em que será seccionado em finas fatias paralelas e, perpendicularmente, ao eixo de construção Z.

Na etapa seguinte, o sistema CAM realiza o processamento da trajetória da ferramenta, para cada uma das camadas bidimensionais e, assim, o arquivo com as informações do comando numérico (NC) da máquina é gerado. Após a obtenção do arquivo NC, ele é enviado para máquina. Ao final desse processo, o componente é fabricado. A última etapa consiste na atividade de pós-processamento, que, geralmente, envolve a limpeza e acabamento da peça, assim, é verificada a importância dos resultados, que são gerados com essa técnica, gerando grande economia no processo em tempos de fabricação e a possibilidade de fabricação de geometrias complexas, ou seja, a utilização da prototipagem rápida por ser considerado um grande marco relacionado a tecnologias de manufatura (CARVALHO; VOLPATO, 2007).

Dentre os softwares de modelagens, alguns se destacam, tais como: o Blender que é utilizado no processo de modelagem, o Zbrush que possui funcionalidades para realizar o tratamento de imagens computacionais, e o software SolidWorks (CAD), utilizado para desenvolvimento e criação de modelos tridimensionais.

### **2.3 Método dos Elementos Finitos**

A indústria cafeeira vem descobrindo as vantagens e benefícios de se conhecer as características operacionais de um produto, por meio de recursos computacionais de simulação numérica, uma tecnologia que a cada dia mais se multiplica nos departamentos de engenharia de empresas de pequeno e grande porte (SILVA; SILVA; MAGALHÃES, 2014).

O aumento do consumo de café, em contraste com a indisponibilidade de mão de obra para a colheita manual, gera a necessidade da mecanização da colheita. Neste cenário, destaca-se a simulação numérica, que pode ser usada na predição do comportamento mecânico das máquinas e, também, de cafeeiros.

Simulações numéricas, auxiliadas por elementos finitos, são cada vez mais comuns para a predição do comportamento mecânico de materiais metálicos, não metálicos e materiais biológicos (CELIK; RENNIE; AKINCI, 2011; LI et al., 2013; NILNONTA et al., 2012). Programas de simulação numérica podem antecipar resultados de testes físicos e gerar relatórios com resultados precisos. Portanto, a simulação numérica é uma ferramenta básica, para engenheiros e pesquisadores, que tratam diretamente de problemas, voltados para a indústria e, também, para o meio acadêmico.

A análise numérica é de fundamental importância em virtude da limitação de soluções pelos métodos convencionais, quase que, exclusivamente, soluções bidimensionais e da grande complexidade de detalhes geométricos e do comportamento tridimensional de tensões mecânicas atuantes em regiões difíceis

de serem analisadas por meio analítico. Bishop (1999) afirma que, independente da situação a qual um componente é submetido por cargas cíclicas, ele pode ser analisado por intermédio do uso de técnicas de elementos finitos, as quais podem gerar resultados, ainda, que na fase de concepção do projeto.

Verifica-se que, quanto mais completa a análise desejada, maior será o grau de complexidade e, conseqüentemente, maior a dificuldade de se obter uma solução adequada. Porém, com o avanço da informática, cientistas e engenheiros passaram a ter acesso a equipamentos com alta capacidade de processamento, que, aliados ao aprimoramento dos métodos numéricos, permitiram a elaboração de programas computacionais que possibilitam análises numéricas baseadas em modelos CAD (*Computer Aided Design*). Dentre os métodos numéricos existentes, destaca-se o MEF, que consiste na subdivisão (discretização) de pequenas áreas ou volumes de um corpo, denominada por malha de elementos finitos (KNIGHT, 1993).

Para o caso tridimensional, a malha é formada por pequenos volumes (elementos) com geometrias pré-definidas, geralmente, elemento tetraédrico ou hexaédrico, que são conectados por nós em um sistema de coordenadas tridimensional. Baseado em cada volume discretizado, podem-se calcular tensões, deformações e deslocamentos no modelo inteiro, como em Savary et al. (2010), que obtiveram a distribuição de tensões em uma árvore cítrica.

O surgimento do MEF deu-se através da indústria aeroespacial (TURNER et al., 1956). Com o aumento da capacidade de processamento de computadores/estações de trabalho e redução no seu custo, a aplicação dos elementos finitos tornou-se comum em diversas áreas da engenharia, principalmente, em acústica (TAKESHI et al., 2104), térmica (BOFANG, 2014) e dinâmica (LEE et al., 2012; NGUYEN-THOI et al., 2014).

Na agrícola, o MEF pode ser utilizado como ferramenta de simulação no comportamento mecânico de frutas e verduras (PIOTR; PIECZYWEK, 2014) e,

também, na mecanização da colheita (MAGALHÃES et al., 2006). Outros métodos numéricos, também, vêm sendo aplicados na engenharia agrícola, como o Método de Elementos de Contorno (ASHRAFI; KASRAEI; FARID, 2008; D'ALFONSO; KAMATH; PURI, 1997; MURASE; KOYAMA; NAKASAKU, 1983) e que pode ser utilizado em conjunto com o MEF na Engenharia Agrícola e em outras aplicações (NG; CHEUNG; XU, 1990).

Mais especificamente, existem vários trabalhos publicados para a determinação de propriedades mecânicas do café (CHANDRASEKAR; VISWANATHAN, 1999; FILGUEIRAS et al., 2000; MARIJA et al., 2012; NEDOMOVÁ et al., 2013; OLUKUNLE; AKINNULI, 2012).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método que utiliza equações diferenciais, para buscar uma solução aproximada do problema analisado, ele é muito utilizado nas áreas de ciências e engenharia. Com o uso do MEF, há possibilidade de realizar a simulação de situações reais em um determinado espaço discreto. O processo de funcionamento do MEF consiste em realizar a subdivisão, inicialmente, do problema, em subdomínios com dimensões finitas de modo que o conjunto de todos esses subdomínios seja igual ao domínio original. Posteriormente, cada subdomínio tem sua solução calculada através do cálculo numérico (HUGHES, 1987).

A alta complexidade de modelos matemáticos, que representa o comportamento de diversos problemas da engenharia, fez com que tivesse o desenvolvimento de métodos aproximados para sua solução, como exemplo, o MEF (GALLAGHER, 1975). O aumento do poder de processamento e a necessidade de estudos de tecnologias modernas são um dos principais fatores que contribuíram para a evolução da área de modelagem matemática utilizando-se, como exemplo, o MEF. Ele já se tornou uma importante ferramenta, para soluções de vários problemas, que são encontrados no ramo da engenharia e seu

uso, também, pode ser verificado para análise das características mecânicas da madeira.

O MEF é uma ferramenta, para análise do comportamento de materiais, utilizados nos projetos estruturais, principalmente, podendo ser utilizado para verificação do comportamento mecânico dessas estruturas. É observado que, historicamente, o MEF ocorreu com a evolução das tecnologias computacionais e com a necessidade de projetar estruturas de modelos contínuos (CHRISTOFORO; LAHR, 2011)

Holmberg, Persson e Petersson (1999) estudaram o comportamento não linear físico da madeira e de outros materiais fibrosos. Foi caracterizado e modelado o problema, com a utilização do MEF, analisando algumas das propriedades mecânicas (como, por exemplo, a rigidez e fluência) de determinadas espécies, sendo consideradas possíveis variações de densidade e fazendo uso de procedimentos de homogeneização.

Forti et al. (2015) realizaram uma pesquisa, para desenvolver e implementar uma formulação, via método dos elementos finitos, objetivando calcular os esforços internos da estrutura mista de concreto e madeira.

Christoforo e Lahr (2011) realizaram um projeto, para determinar o valor do módulo de elasticidade para as estruturas planas de madeiras do tipo treliça, buscando facilitar a escolha da espécie, ou do conjunto de espécies, que seriam mais adequadas para análise das estruturas projetadas, seja no caso relacionado à área artesanal, ou seja, no processo de pré - fabricação.



### 3 METODOLOGIA

Neste projeto, utilizaram-se softwares livres e comerciais para a realização de modelagens e simulações numéricas. No caso deste trabalho, o tronco e galhos foram, computacionalmente, modelados, após digitalização, utilizando o software livre Blender<sup>®</sup> 3D , versão 2.7 e testes de simulações, via elementos finitos, foram realizados utilizando o software Solidworks<sup>®</sup>.

Foram amostradas em campo quatro plantas de café, utilizadas na realização de testes experimentais. Foram digitalizadas, tridimensionalmente, as amostras do tronco cafeeiro (ortotrópico), com uso do aparelho Scanner Artec 3D<sup>®</sup> móvel a laser. Originaram modelos virtuais que foram renderizados e modelados computacionalmente.

O desenvolvimento do modelo computacional da árvore cafeeira foi realizado, no ambiente virtual do software modelador, pela junção do modelo computacional da ramificação plagiotrópica com o modelo computacional do tronco cafeeiro.

Por fim, simulações numéricas, via elementos finitos, foram realizadas no modelo tridimensional da árvore cafeeira, com o objetivo de validar o modelo digitalizado do cafeeiro, para predição do comportamento mecânico.

Para cumprir os objetivos estabelecidos neste trabalho, as seguintes etapas foram estabelecidas:

- a) Coleta de Amostras da árvore cafeeira;
- b) Modelagem Computacional da árvore cafeeira;
- c) Desenvolvimento do Modelo Computacional da árvore cafeeira;
- d) Validação do Modelo Computacional;
- e) Testes de Simulações Numéricas;
- f) Análise dos Resultados.

### 3.1 Coleta de Amostras

Esta etapa consistiu em realizar as atividades de desfolha, derrubada, estratificação, identificação e conservação das amostras da planta cafeeira. Foram utilizados cafeeiros pertencentes à família Rubiaceae, gênero *Coffea* arábica L, cultivar Catuaí Vermelho, variedade IAC 144, de uma lavoura mecanizada com 8 anos, plantada no espaçamento 0,80 por 3,50 m, coletados em uma propriedade rural, no município de Nepomuceno - MG (FIGURA 1), localizado na região do sul de Minas Gerais, Brasil, no período de colheita (estação seca) e na entressafra (estação chuvosa), de 2013 a 2014.

Figura 1 - Lavoura Cafeeira



Fonte: Do autor (2015)

#### 3.1.1 Caracterização da área

As amostras de plantas de café foram coletadas, no mesmo talhão e na mesma linha de plantio, em cafeeiros pareados, em uma fazenda da região do Sul de Minas, com condições adequadas para mecanização agrícola e colheita mecanizada.

### 3.1.2 Averiguação e Seleção dos Cafeeiros

A escolha de uma lavoura cafeeira uniforme, implantada no sistema de plantio mecanizado, em fase fisiológica adulta de produção, com altura média dos cafeeiros (FIGURA 2) entre 1.80m e 2.00m, características reais ideais para realização de projeto.

Figura 2 - Planta de Café e Inserção do 1º par de ramos.



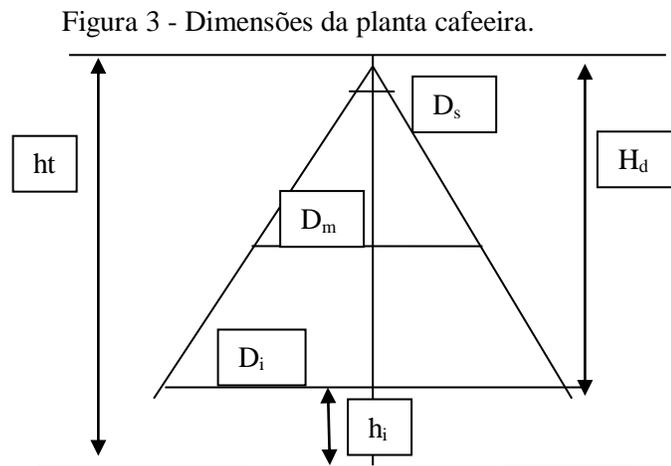
Fonte: Do autor (2015)

As árvores cafeeiras foram identificadas com a mensuração do diâmetro do caule principal, com uso do paquímetro, na região entre o solo e a inserção do primeiro par de ramos, na secção inferior do dossel da planta de café, selecionadas, com referência à dimensão mínima do caule do cafeeiro, para a extração de corpos-de-prova, cujas dimensões estão pré-estabelecidas por norma de Projetos de Estrutura de Madeira (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1997).

A dimensão mínima do diâmetro do tronco do cafeeiro, para sua seleção, foi calculada e estipulada no valor mínimo de 7 cm, na região indicada do terço médio inferior da parte aérea da planta de café, com a finalidade para o corte e obtenção dos corpos-de-provas utilizados nos ensaios mecânicos aplicados à madeira.

### 3.1.3 Dados de Campo

Foram selecionadas quatro plantas cafeeiras, tendo como parâmetro o diâmetro do ortotrópico do cafeeiro, entre a altura de inserção do primeiro par de ramos, conforme a arquitetura da planta de café (FIGURA 3).



Fonte: Adaptado de Favarin (2002, p. 771).

Os dados coletados em campo da planta de café utilizada na digitalização foram:

ht - Altura da Planta: 2,00 m.

H<sub>d</sub> - Altura do dossel: 1,70 m.

h<sub>i</sub> - Altura de inserção do primeiro par de ramos: 0,30m.

D<sub>i</sub> - Diâmetro da seção inferior do dossel: 0,80 m.

$D_m$  - Diâmetro da seção média do dossel: 0,50m.

$D_s$  - Diâmetro da seção superior do dossel: 0, 25 m.

As dimensões mensuradas da estrutura morfológica da árvore cafeeira estabeleceram dados necessários, para estimar parâmetros de cálculos, como o diâmetro do tronco cafeeiro, na seção inferior e à altura do dossel da planta cafeeira, utilizados para a seleção e corte de corpos-de-provas e, no cálculo dimensional, para o seccionamento das amostras a serem digitalizadas, respectivamente.

#### **3.1.4 Desfolha e Poda**

O procedimento de desfolha e poda foram realizados com uma ferramenta de corte, tesoura de poda, com a finalidade de obter a estrutura lenhosa da planta de café e destacar as partes morfológicas importantes da arquitetura da árvore cafeeira e viabilizar procedimentos posteriores.

Após a identificação e seleção da árvore cafeeira na lavoura, retiraram-se as folhas e o excesso de ramos plagiotrópicos, presentes no cafeeiro (FIGURA 4), realizado de forma a representar o terço médio superior e inferior da estrutura morfológica da planta de café.

Figura 4 - Planta de Café: Poda e Desfolha.



Fonte: Do autor (2015)

### 3.1.5 Corte

A derrubada consistiu em retirar a planta da lavoura, depois das etapas anteriores realizadas, com um corte na secção transversal do tronco, na base da planta de café, na interface solo-planta, com uma roçadora manual equipada com uma lâmina circular de quarenta dentes.

Quatro plantas de café foram cortadas para os testes experimentais. Apenas uma planta de café (terceira coletada) foi utilizada na montagem do modelo tridimensional do cafeeiro. As outras plantas de café restantes foram utilizadas, em testes experimentais, para a obtenção de corpos- de- provas.

### 3.1.6 Seccionamento e corte

A etapa de seccionamento consistiu em particionar o eixo vertical de sustentação de folhas e ramos plagiotrópicos, tronco principal ou ortotrópico. Após a poda dos ramos laterais ou plagiotrópicos, em dimensões calculadas, no valor máximo de 30 cm de altura, em função da altura de captação e detecção de imagem pelo aparelho Scanner, em uma distância pré-definida, na digitalização das amostras seccionadas ou particionadas do tronco cafeeiro. O seccionamento foi realizado com uma ferramenta de corte, serrote de mão e a mensuração dos tamanhos das amostras com uso de uma fita métrica (FIGURA 5).

Figura 5 - Materiais utilizados nos ensaios.



Fonte: Do autor (2015)

Na amostra da planta cafeeira, particionada entre as dimensões de 25 cm e 30 cm, nove partes foram obtidas do seccionamento ou corte. As nove partes de madeira do tronco principal do cafeeiro foram identificadas e preparadas para a digitalização e reestruturação virtual tridimensional da amostra de planta cafeeira selecionada em campo.

### 3.1.7 Identificação e preparação

Na etapa de identificação e preparação do material, foi realizada a numeração das partes seccionadas (FIGURA 6) do eixo vertical (tronco principal), para posterior identificação e montagem do modelo tridimensional computacional da planta cafeeira, no processo de digitalização tridimensional das partes ou amostras do tronco cafeeiro.

Na preparação das amostras do tronco cafeeiro, o lixamento foi realizado no material, com uma lixa para madeira nº 36, com a finalidade de remover a casca das amostras do tronco cafeeiro, obtendo-se uma superfície lisa, nas amostras sem perdas significativas de material (madeira), apresentando os contornos e texturas originais da superfície do tronco cafeeiro.

Nas amostras de madeira seccionadas do tronco principal do cafeeiro, as inserções das ramificações presentes na madeira cafeeira, após a poda, foram lixadas, o que facilitou os trabalhos posteriores de digitalização e modelagem das ramificações plagiotrópicas.

Figura 6 - Partes seccionadas da planta de café.



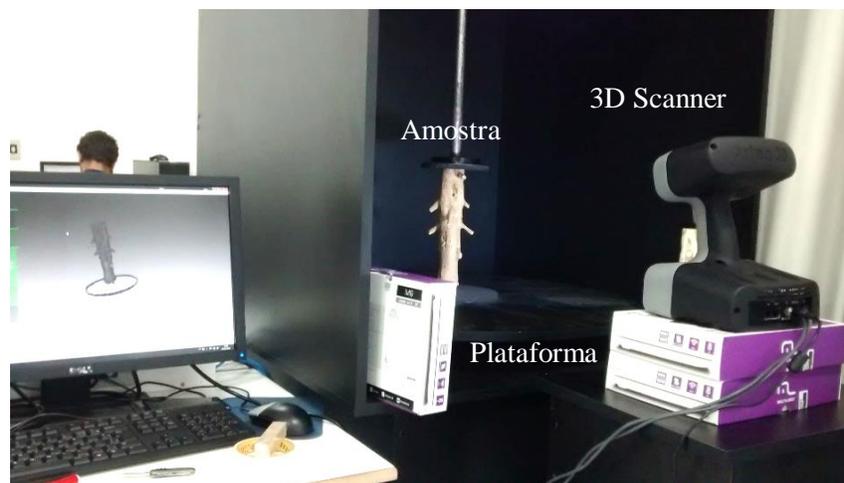
Fonte: Do autor (2015)

### 3.2 Modelagem Computacional e Digitalização das Amostras

Esta etapa consistiu em realizar as atividades de digitalização tridimensional das amostras do tronco cafeeiro, renderização e conversão de arquivos para os sistemas CAD/CAE/CAM.

A digitalização tridimensional foi realizada com uso de um aparelho Scanner Artec 3D®, móvel a laser (FIGURA 7), no Laboratório de Realidade Virtual, do Departamento das Ciências da Computação, da Universidade Federal de Lavras - UFLA.

Figura 7 - Procedimento de Digitalização, fase de testes.



Fonte: Do autor (2015)

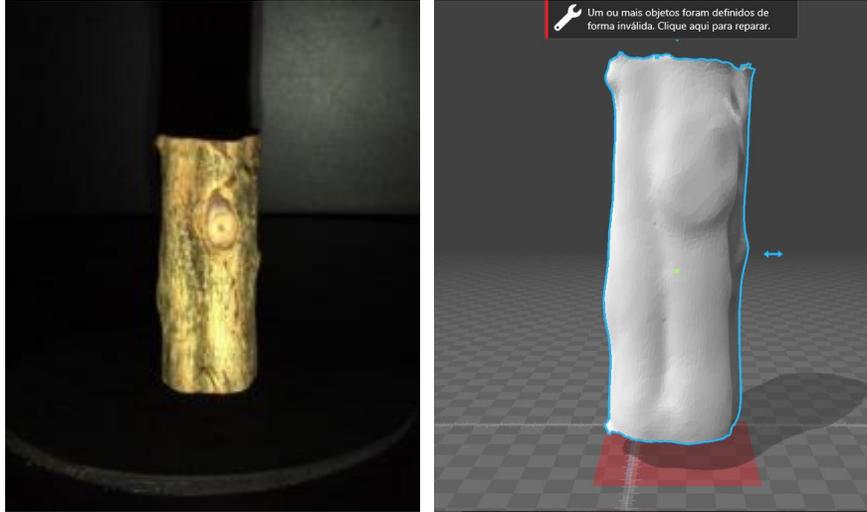
Inicialmente, vários testes foram realizados na captura de imagens tridimensionais (3D), tendo como amostra inicial, uma parte do tronco do cafeeiro. No teste experimental inicial de digitalização tridimensional de uma amostra do tronco cafeeiro, a técnica de varredura ou de escaneamento foi realizada com a finalidade de obter detalhes e curvas da superfície do material, que, aliado com softwares computacionais, obteve modelos virtuais tridimensionais representativos do objeto (tronco cafeeiro).

Durante os testes experimentais de digitalização tridimensional, a varredura superficial das amostras de madeira do tronco cafeeiro procedeu-se a uma distância de 70 mm entre o aparelho Scanner 3D a laser e o objeto fixo (tronco cafeeiro) definida como ideal na captação de imagens tridimensionais das amostras, em função do histograma de detecção de digitalização do software Artec Studio 8 do aparelho Scanner. Nos testes experimentais de digitalização, o tronco do cafeeiro foi posicionado no eixo Z sob uma bandeja rotativa de apoio com uma distância pré-definida em relação ao aparelho Scanner fixado em uma plataforma (FIGURA 7).

O procedimento de escaneamento ou de digitalização tridimensional a laser foi realizado com a rotação manual da bandeja de apoio e o aparelho Scanner fixo, sendo realizados testes de captação de imagens virtuais 3D, obtendo vários modelos tridimensionais que foram manipulados, computacionalmente, para serem simulados e analisados posteriormente.

A amostra inicial do tronco cafeeiro com diâmetro de 50 mm e de altura 135 mm, e outras amostras de dimensões maiores, utilizadas nos testes experimentais, contribuíam para aplicação e o ajuste de um procedimento padrão, desenvolveu-se um protocolo para digitalização tridimensional do tronco cafeeiro (FIGURA 8).

Figura 8 - Amostra inicial e sua digitalização 3D arquivo (WRL).

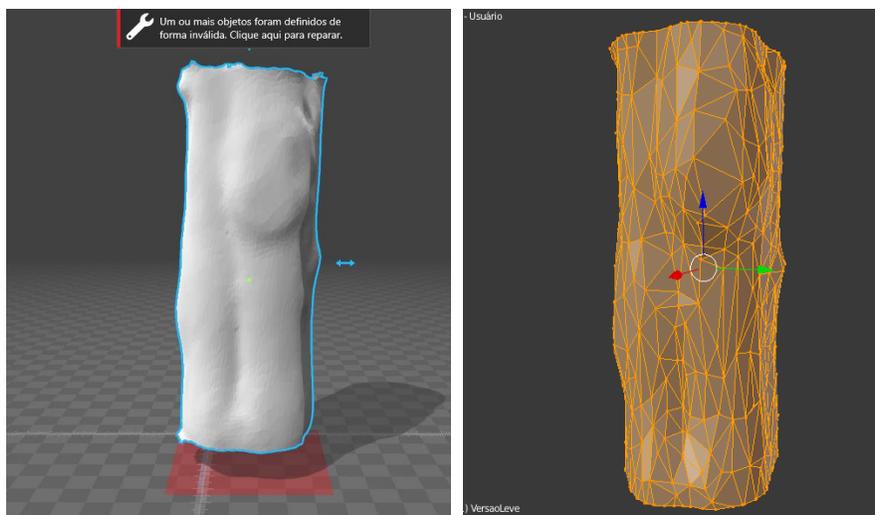


Fonte: Do autor (2015)

Iniciou-se, após a aplicação e o ajuste dos procedimentos de digitalização, por meio das amostras iniciais do tronco cafeeiro nos testes experimentais, a digitalização das partes seccionadas da planta do cafeeiro (FIGURA 6), preparadas nas etapas anteriores, nas dimensões pré-definidas.

Foram exportados os arquivos de imagens gráficas (FIGURA 9), gerados no formato (wrl) dos processos de digitalização, para software Blender 3D, para serem modeladas, renderizadas e processadas computacionalmente.

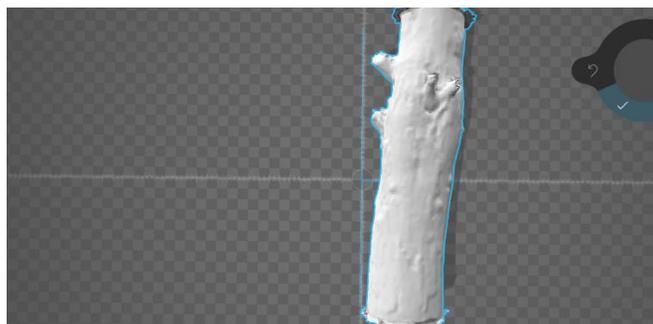
Figura 9 - Amostra inicial digitalização 3D (WRL) e imagem no Blender.



Fonte: Do autor (2015)

Imagem gráfica 3D digitalizada do tronco cafeeiro ( Figura 10).

Figura 10 - Imagem digitalizada do aparelho Scanner (arquivo wrl).



Fonte: Do autor (2015)

Amostras iniciais do tronco cafeeiro (FIGURA 11) e os modelos digitalizados dos testes experimentais foram exportados para software livre de modelagem.

Figura 11 - Amostras iniciais de teste e suas digitalizações no software Blender.



Fonte: Do autor (2015)

### 3.2.1 Renderização das modelos digitalizados

Nesta etapa, com uso do software modelador Blender 3D, realizou-se a redução do nível de detalhamento da malha de elementos digitalizados, constituintes do modelo geométrico virtual das amostras, para níveis de baixa resolução, pelo processo de renderização, que consistiu em diminuir a discretização ou subdivisão dos elementos geométricos formadores da malha, constituída de vértices, arestas, faces e polígonos, da imagem 3D digitalizada, necessário para o processamento e simulação computacional em programas específicos, nas etapas posteriores.

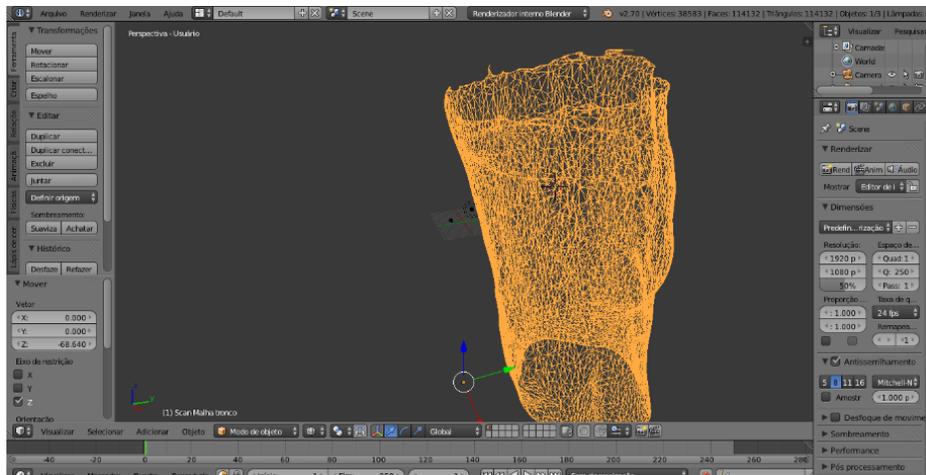
O processo de renderização reduziu os detalhes geométricos dos modelos digitalizados 3D, com a finalidade de compactar os arquivos gerados e facilitar sua manipulação e simulação computacional em softwares específicos, em razão do elevado nível de uso de memória e capacidade de processamento, consumidos pelos modelos geométricos digitalizados, nas estações de trabalho.

Ao final, utilizou-se novamente do software Blender 3D, para modelar com um corte na secção transversal do modelo tridimensional, na realidade

virtual, no topo de cada extremidade, de cada modelo computacional das amostras seccionadas, eliminando-se os ruídos presentes nas imagens digitalizadas (FIGURA 12) e preparando para o preenchimento da superfície, nas extremidades já cortas.

O preenchimento da superfície foi realizado por uma ferramenta de modelagem do próprio software, nas extremidades dos modelos, com a finalidade de facilitar a manipulação computacional posterior, de junção dos modelos computacionais, das amostras digitalizadas e renderizadas, da árvore cafeeira.

Figura 12 - Modelo Tridimensional da amostra inicial do tronco cafeeiro.



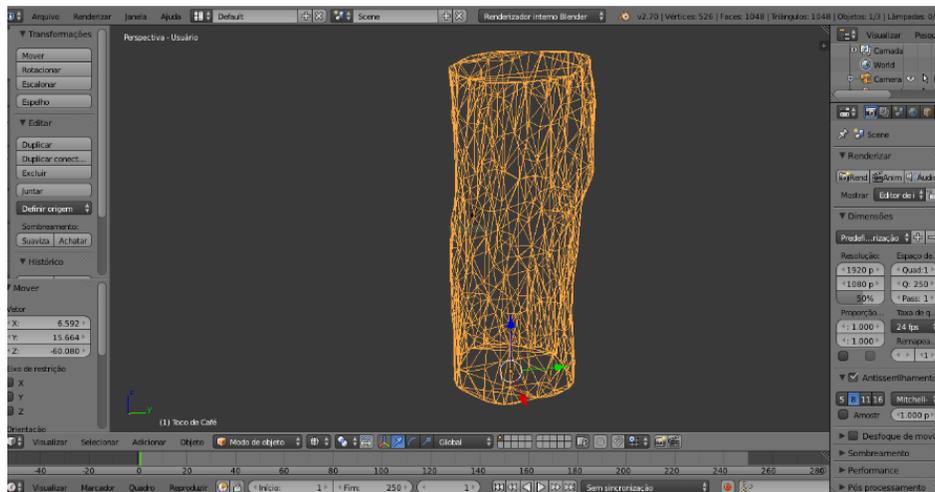
Fonte: Do autor (2015)

O processamento da imagem (renderização), no software Blender 3D, do modelo tridimensional da amostra inicial digitalizada do tronco cafeeiro, apresentou um arquivo inicial de 54 MB, com imagem virtual formada por uma malha geométrica de elementos triangulares, com 38.591 vértices, 114.138 faces e 114.144 triângulos.

Após a renderização do modelo computacional, o arquivo compactado final de 51 kB e a imagem virtual, formada por uma malha discretizada de elementos triangulares, com 534 vértices, 1054 faces e 1060 triângulos, conforme a Figura 13.

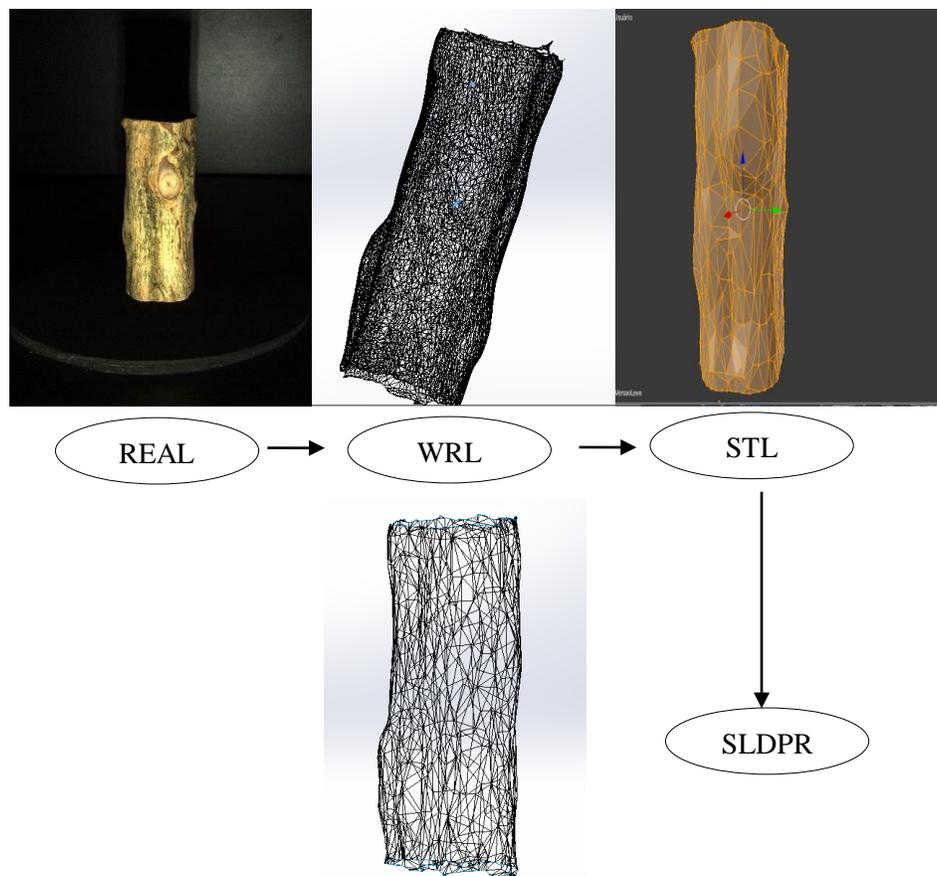
Por fim, os arquivos gerados foram salvos no formato STL, compatíveis com os principais sistemas CAD (FIGURA 14), sendo realizados testes preliminares de simulação numérica computacional, como um parâmetro, para a renderização dos modelos virtuais, em decorrência da capacidade de processamento e memória dos recursos computacionais disponíveis.

Figura 13 - Modelo tridimensional renderizado da amostra inicial do tronco cafeeiro.



Fonte: Do autor (2015)

Figura 14 - Conversão de arquivos.



Fonte: Do autor (2015)

O desenvolvimento de um protocolo, para digitalização tridimensional da árvore cafeeira, seguiu uma sequência lógica de procedimentos e atividades, por ajustes de testes experimentais, na realização da modelagem geométrica tridimensional do cafeeiro, com base em uma amostra inicial do tronco cafeeiro, como referência para a elaboração do projeto (FIGURA 14).

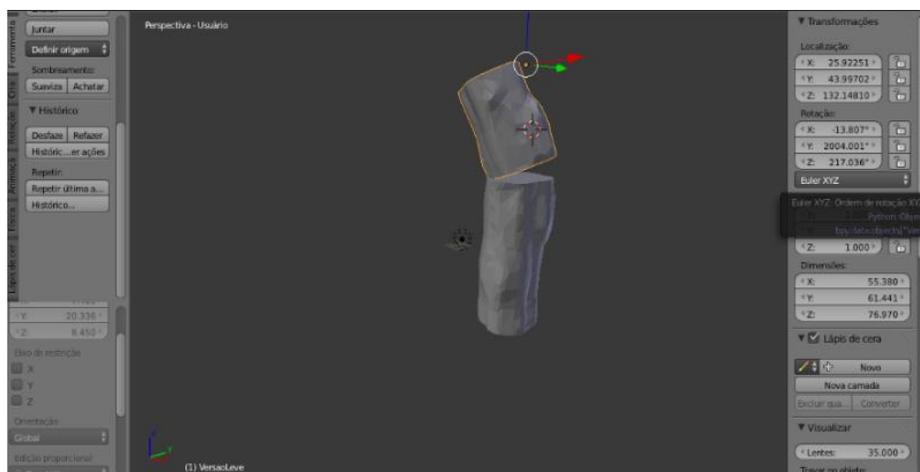
### 3.3 Desenvolvimento do Modelo Computacional

Esta etapa consistiu em realizar as atividades de junção dos modelos computacionais das amostras do tronco cafeeiro digitalizadas, retopologia computacional de uma ramificação plagiotrópica e montagem do modelo computacional da árvore cafeeira.

#### 3.3.1 Junção dos modelos computacionais das amostras

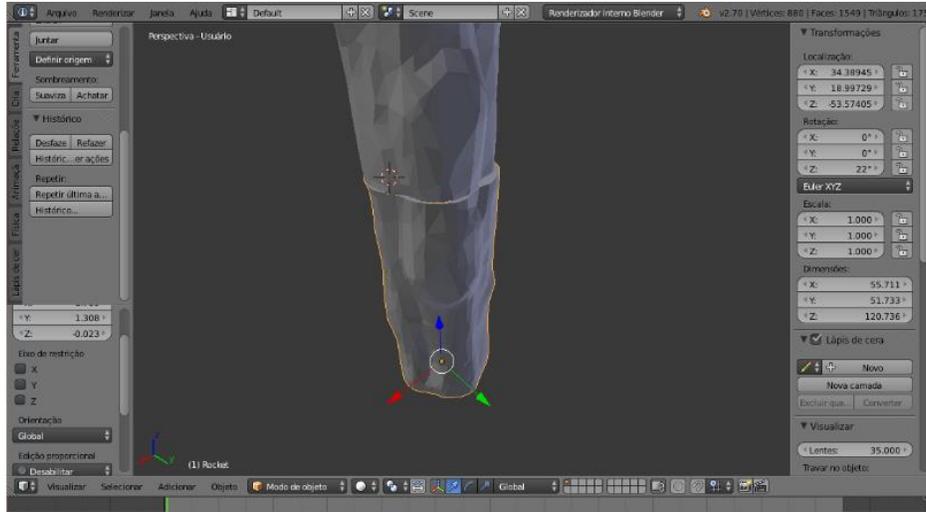
Nesta etapa, foram realizadas as junções dos modelos digitalizados das partes ou amostras do tronco ortotrópico da árvore cafeeira, selecionada em campo. A interligação dos modelos computacionais, realizada pelo software modelador, Blender 3D, de acordo com as posições consecutivas das amostras identificadas, no seccionamento tronco cafeeiro, conforme as Figuras 15 e 16.

Figura 15 - Junção das partes do tronco cafeeiro de amostras para testes.



Fonte: Do autor (2015)

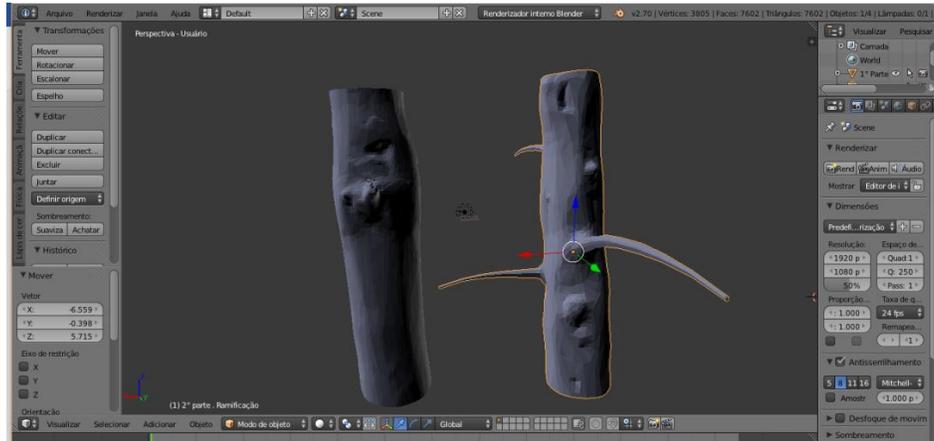
Figura 16 - Junção das partes do tronco de amostras para testes.



Fonte: Do autor (2015)

A reformulação do tronco ortotrópico e sua montagem (FIGURA 17) sucedeu-se com a união dos vértices presentes na linha de bordadura das extremidades, formada por arestas e vértices, de ambos os modelos consecutivos. Uniram -se as superfícies planas das extremidades, por meio das malhas geométricas de cada modelo virtual, de amostras consecutivas modeladas, em posições marcadas, de acordo com o posicionamento direcional das nove amostras reais, na formação do tronco ortotrópico inteiro do cafeeiro.

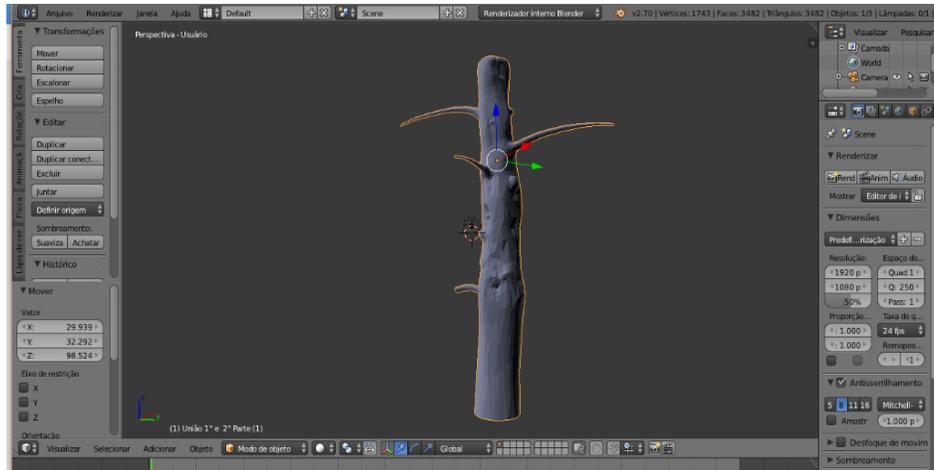
Figura 17 - Amostras da 1ª planta de teste e suas digitalizações no software Blender.



Fonte: Do autor (2015)

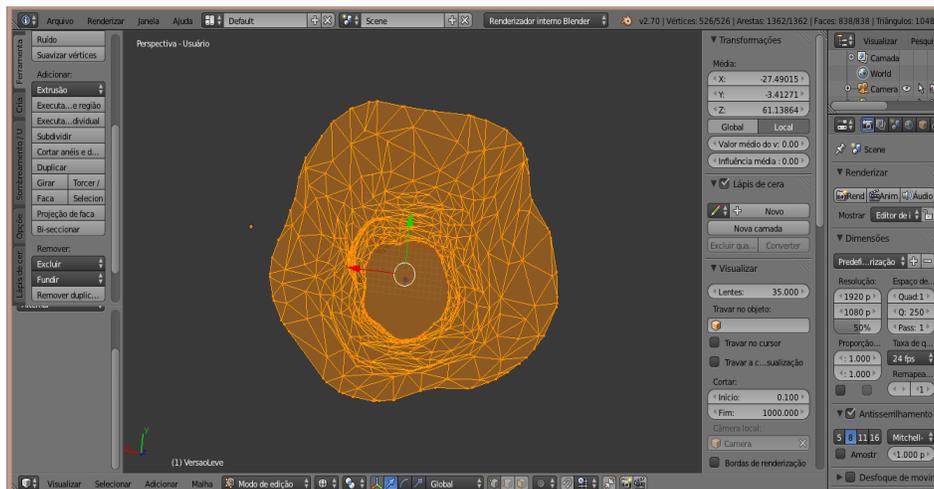
No seccionamento do tronco cafeeiro, há uma perda de material, em razão do corte da ferramenta. No entanto, na modelagem, foi possível preencher essa perda com um cordão de malha geométrica, interligando as superfícies das extremidades de dois modelos consecutivos (FIGURA 18), na união dos vértices das linhas de bordadura (FIGURA 19), na espessura da lâmina de corte, por intermédio das arestas de ligação com os vértices, na modelagem de junção de modelos virtuais em ambiente de realidade virtual.

Figura 18 - União de amostras da 1ª planta de testes.



Fonte: Do autor (2015)

Figura 19 - Vértices da linha de bordadura da extremidade do tronco cafeeiro.



Fonte: Do autor (2015)

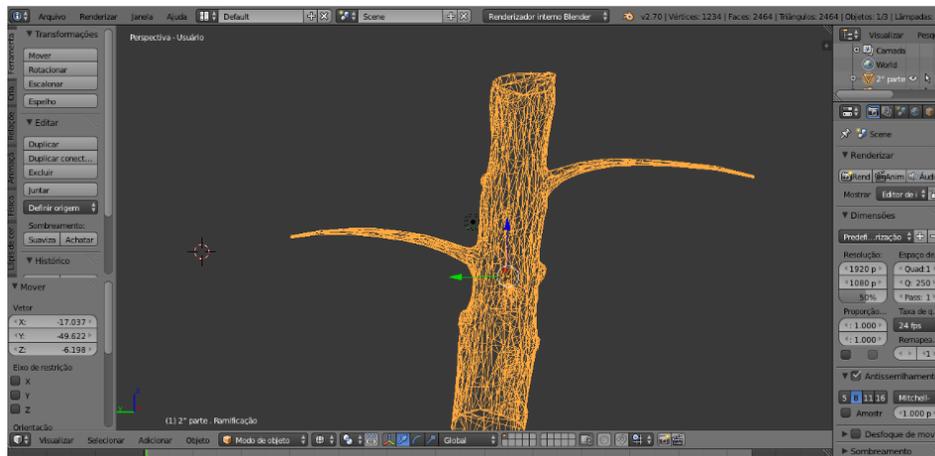
### 3.3.2 Retopologia computacional

Nesta etapa, foi realizada a retopologia das ramificações plagiotrópicas pelo procedimento de contorno de molde, na realidade virtual de uma imagem,

capturada por um aparelho fotográfico, de uma ramificação plagiotrópica estabelecida como padrão.

No entanto, conforme Figura 20, as ramificações realizadas foram extrudadas dos nódulos ou inserções da superfície do tronco cafeeiro já digitalizado e renderizado, por uma ferramenta de modelagem do software, Blender 3D.

Figura 20 - Ramificações extrudadas da superfície do tronco cafeeiro.



Fonte: Do autor (2015)

Com o corte das ramificações plagiotrópicas e o lixamento das inserções, após o corte, no tronco cafeeiro, originaram -se ondulações ou nódulos, na superfície das amostras de madeira do tronco cafeeiro. Esses ressaltos, presentes na superfície da madeira cafeeira, são os locais onde as ramificações plagiotrópicas emergiam do tronco cafeeiro principal ou ortotrópico (FIGURA 21).

Com a finalidade de representar as ramificações plagiotrópicas, iniciaram -se os testes experimentais de modelagens das ramificações plagiotrópicas, no ambiente computacional, com a extrusão da malha geométrica

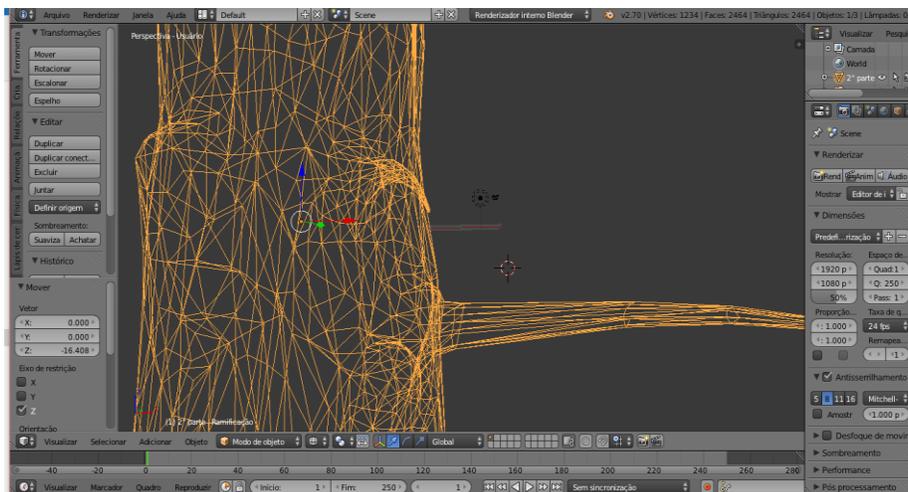
nos locais de inserções, nos modelos digitalizados e renderizados, conforme a Figura 22.

Figura 21 - Exemplo da inserção de uma amostra de testes do tronco cafeeiro.



Fonte: Do autor (2015)

Figura 22 - Exemplo de uma amostra de testes do tronco cafeeiro com inserção.



Fonte: Do autor (2015)

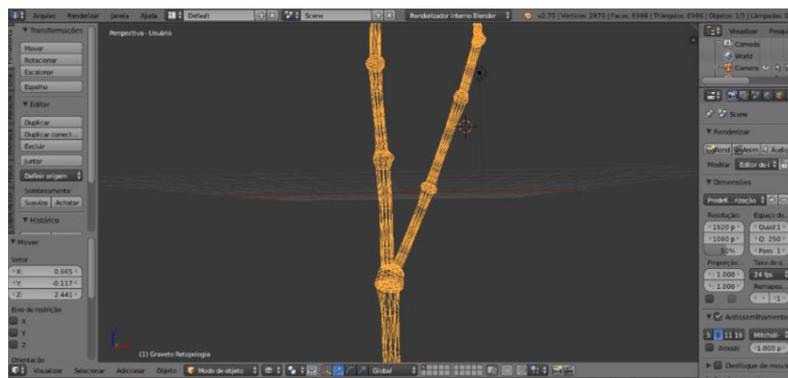
Após os testes experimentais de extrusões da malha geométrica dos modelos virtuais, iniciou-se a retopologia das ramificações plagiotrópicas, um procedimento de contorno do molde (imagem fotográfica), na realidade virtual, por meio de uma ferramenta de desenho, do software Blender 3D, conforme as Figuras 23 , 24 e 25.

Figura 23 - Ramificação plagiotrópica utilizada na modelagem.



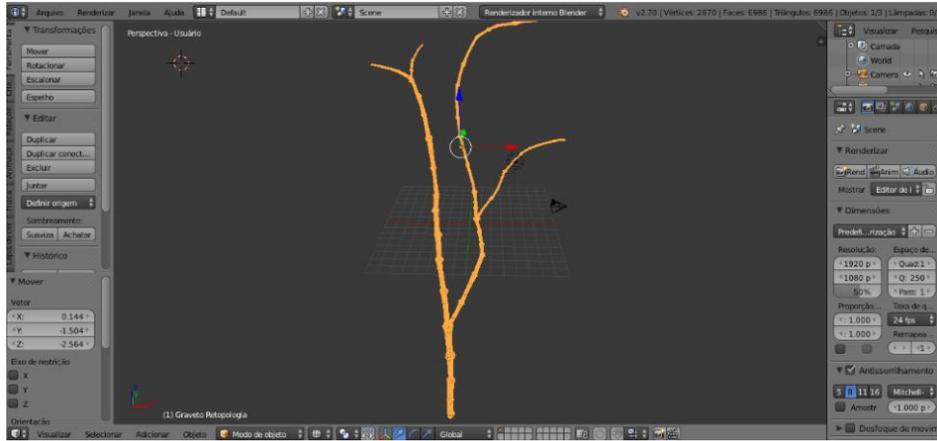
Fonte: Do autor (2015)

Figura 24 - Ramificação plagiotrópica modelada.



Fonte: Do autor (2015)

Figura 25 - Ramificação Plagiotrópica utilizada como molde na modelagem.



Fonte: Do autor (2015)

### 3.3.3 Montagem do Modelo Computacional

Após os ajustes dos procedimentos dos testes experimentais de junção de modelos virtuais das amostras do tronco cafeeiro, modelagem e retopologia das ramificações plagiotrópicas, iniciou-se a construção do modelo tridimensional da árvore cafeeira, da segunda planta cafeeira coletada (FIGURA 26), como amostra para modelagem geométrica computacional.

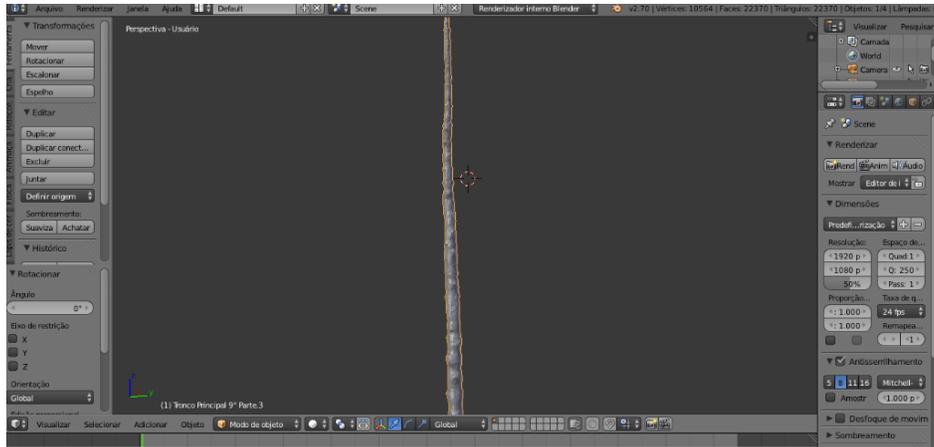
Figura 26 - Montagem das partes seccionadas ou amostras do tronco cafeeiro.



Fonte: Do autor (2015)

Realizou-se a montagem do modelo computacional do tronco cafeeiro ou ortótropico, em ambiente virtual, no software Blender 3D, conforme descrito à sequência de procedimentos das etapas anteriores, dos modelos geométricos tridimensionais renderizados e modelados, das amostras ou partes seccionadas do tronco cafeeiro digitalizadas, computacionalmente, conforme representado pela Figura 27.

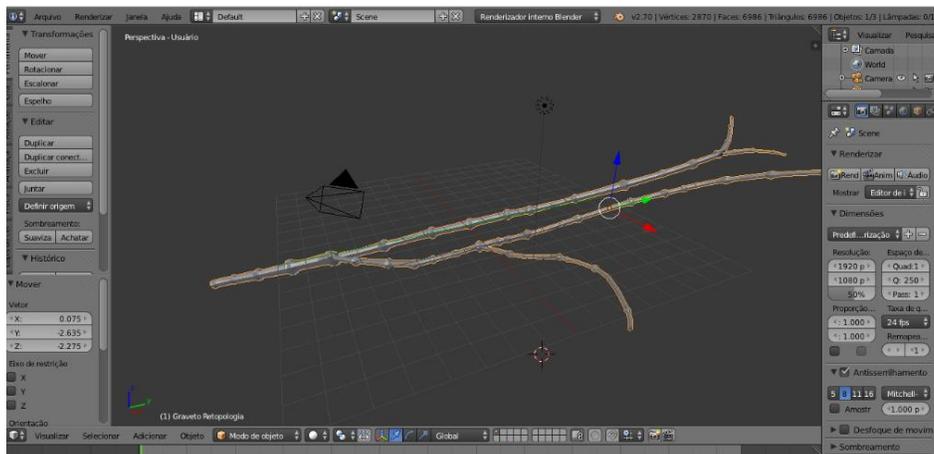
Figura 27 - Modela virtual do tronco cafeeiro ortotrópico.



Fonte: Do autor (2015)

Com a montagem do modelo geométrico computacional do tronco cafeeiro ou ortotrópico e com o modelo geométrico computacional de uma ramificação plagiotrópica (FIGURA 28), realizou-se a montagem do modelo computacional da árvore cafeeira.

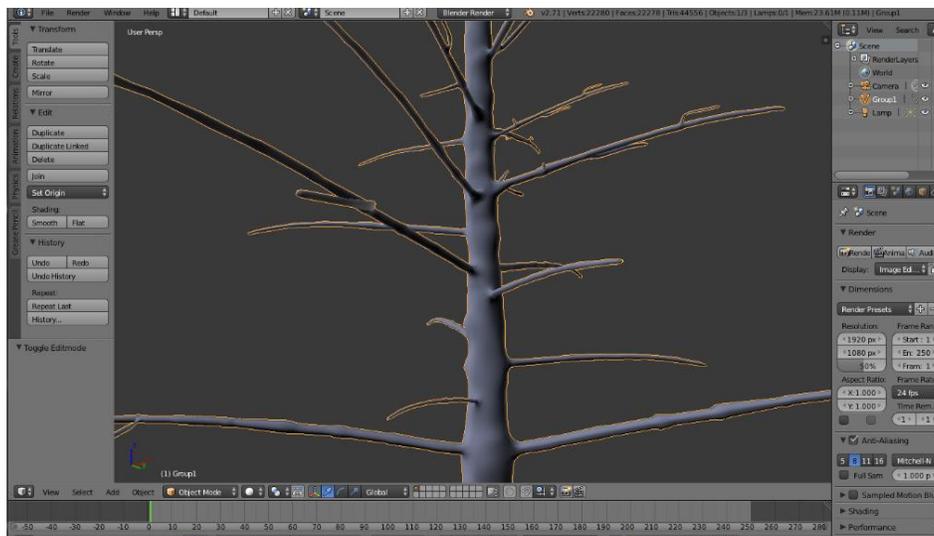
Figura 28 - Modelo virtual do ramo plagiotrópico do cafeeiro.



Fonte: Do autor (2015)

A construção do modelo computacional da árvore cafeeira (FIGURA 29) foi realizada interligando a malha geométrica do modelo computacional da ramificação plagiotrópica, com a malha geométrica do modelo computacional do tronco cafeeiro, na realidade virtual, pelo software Blender 3D, pela união dos vértices da malha, nas áreas nodulares geométricas presentes na superfície do modelo tridimensional do tronco cafeeiro principal.

Figura 29 - Modelo Computacional da estrutura lenhosa da árvore cafeeira.



Fonte: Do autor (2015)

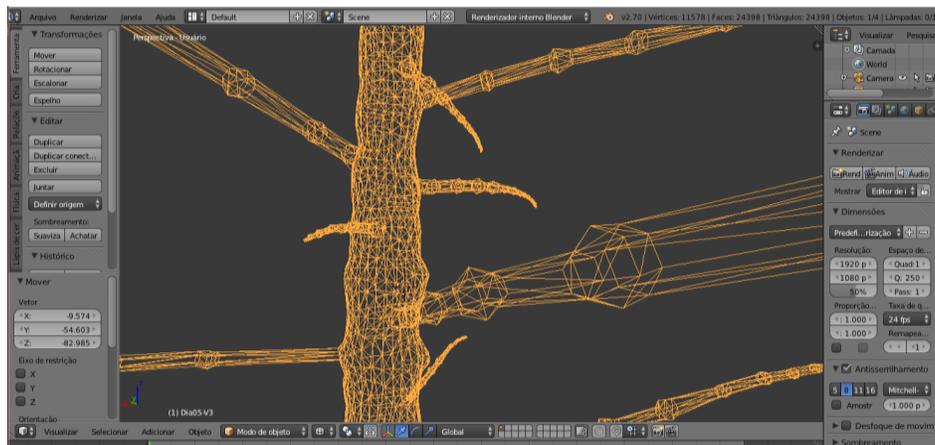
O modelo computacional da ramificação plagiotrópica (retopologia) foi simplificado, para um modelo computacional de um ramo de primeira ordem, ou seja, com apenas uma ramificação, sem nós, o que caracteriza as ramificações de primeira ordem, na morfologia da árvore cafeeira.

Na construção do modelo computacional da estrutura lenhosa da árvore cafeeira, foi adicionado, ao modelo computacional do tronco cafeeiro, um total de dez modelos de ramificações plagiotrópicas, distinto nas suas dimensões.

Com um modelo base computacional de uma ramificação plagiotrópica, geraram-se outras cópias computacionais, deste modelo base e foi realizada, em cada modelo copiado, a variação de suas dimensões pela ferramentas de modelagem do programa.

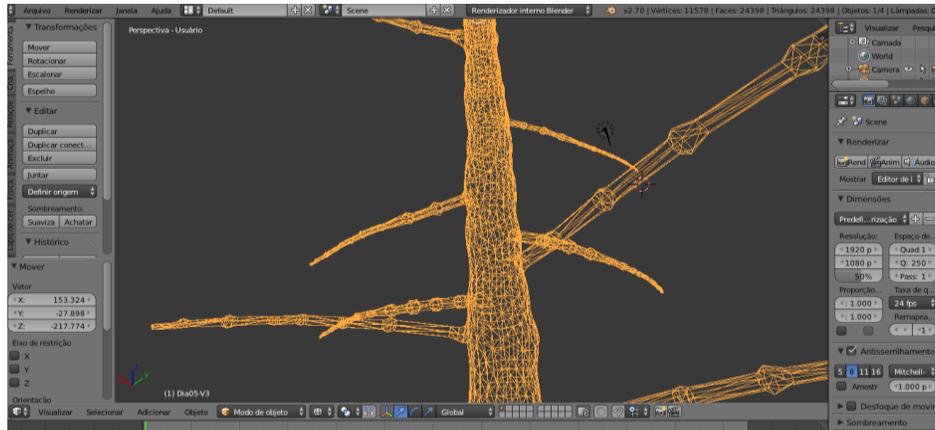
O modelo tridimensional da árvore cafeeira apresentou um arquivo de 851 KB, com imagem virtual formada por uma malha geométrica de elementos triangulares, com 11.578 vértices, 24.398 faces e 24.398 triângulos, conforme representado nas Figuras 30, 31 e 32.

Figura 30 - Modelo computacional da árvore cafeeira.



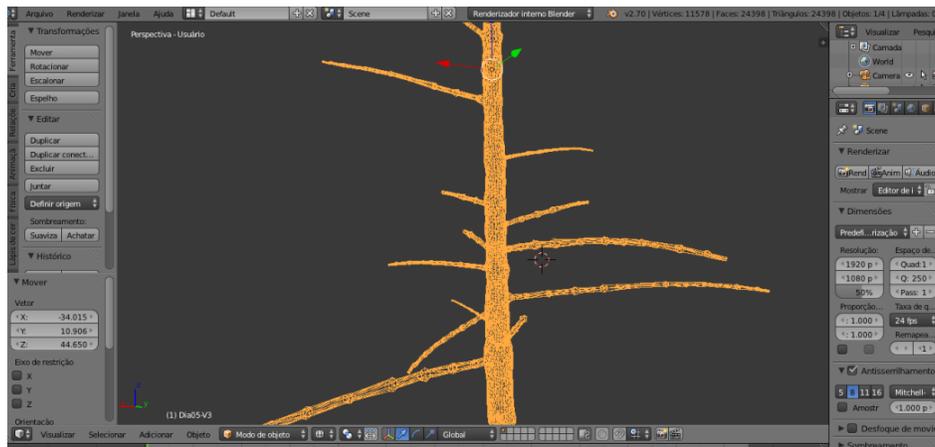
Fonte: Do autor (2015)

Figura 31 - Modelo geométrico da árvore cafeeira.



Fonte: Do autor (2015)

Figura 32 - Modelo tridimensional da árvore cafeeira.



Fonte: Do autor (2015)

### 3.4 Determinação das propriedades físico-mecânicas da madeira do cafeeiro

A obtenção das propriedades físico-mecânicas da madeira do cafeeiro foi realizada no Laboratório de Tecnologia da Madeira, do Departamento de

Ciências Florestais e no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras - UFLA.

A normalização técnica, para determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira cafeeira, nos ensaios realizados, seguiu, segundo a norma brasileira NBR 7190/1997 - Projetos de Estrutura de Madeira (ABNT, 1997).

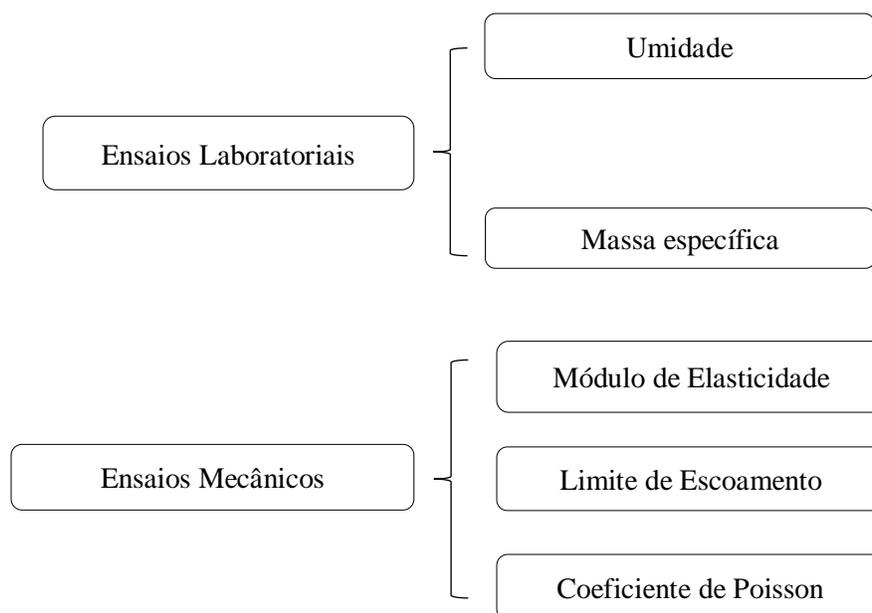
O módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, massa específica e limite de escoamento foram extraídos da madeira cafeeira, necessários para a realização dos testes experimentais de simulação numérica no software Solidworks, sendo estas propriedades mecânicas determinadas em função da umidade presente nos corpos-de-prova.

Na amostragem, os corpos-de-prova foram extraídos de troncos de cafeeiros coletados em campo e o procedimento de corte, orientado do tronco principal ou ortotrópico, foi realizado na serra circular de bancada, após a poda e desfolha das árvores cafeeiras, selecionadas em função do valor mínimo pré-estabelecido do diâmetro do caule, para extração dimensional dos corpos-de-prova.

Foi realizado, no Laboratório de usinagem da Tecnologia da Madeira, do Departamento de Ciências Florestais, os procedimentos de corte orientado do eixo vertical do tronco cafeeiro, para extração dos corpos-de-prova, utilizados nos ensaios laboratoriais, para a determinação da massa específica da madeira cafeeira e umidade e nos ensaios mecânicos, na determinação do módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e limite de escoamento ( Figura 33).

Foram confeccionados quatorze corpos-de-provas, de troncos de duas árvores cafeeiras coletadas em campo, e oito corpos-de-provas confeccionados foram utilizados, na determinação da massa específica da madeira cafeeira e sua umidade e seis corpos-de-provas, utilizados nos ensaios mecânicos de compressão paralelo às fibras da madeira cafeeira, na determinação do módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e Limite de Escoamento.

Figura 33 - Diagrama da estrutura de atividades.



Fonte: Do autor (2015)

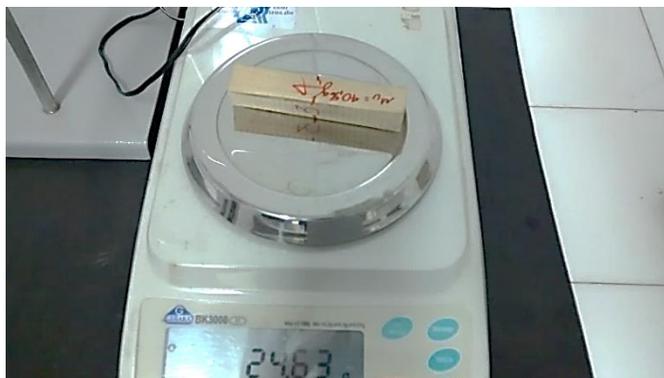
### 3.4.1 Ensaio Laboratoriais

Os ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Madeira, no Departamento de Ciências Florestais, na determinação das propriedades físicas da madeira cafeeira: massa específica e teor de água.

#### 3.4.1.1 Teor de água da Madeira Cafeeira

No laboratório de Estufas e Secagem, foi realizada a medição da massa inicial dos oito corpos-de-prova, em uma balança analítica (FIGURA 34). Determinou-se a massa inicial dos corpos-de-provas com exatidão de 0,01 g. Nos ensaios laboratoriais, três corpos-de-provas, com dimensões 20 mm x 20 mm x 100 mm, foram utilizados na obtenção valor médio do teor de água.

Figura 34 - Balança de precisão com amostra de tronco cafeeiro.



Fonte: Do autor (2015)

O procedimento de obtenção do teor de água da madeira cafeeira seguiu a norma brasileira NBR 7190/1997 - Projetos de Estrutura de Madeira (ABNT,1997).

Após a determinação da massa inicial ( $m_i$ ), os três corpos-de-provas foram colocados na câmara de secagem, estufa com circulação mecânica MOD 320 E (FIGURA 35) com a temperatura de 103°C.

Figura 35 - Câmara de secagem com amostras de tronco cafeeiro.



Fonte: Do autor (2015)

Foram medidas as massas dos corpos -de-prova, durante a secagem das massas iniciais, a cada 6h, até serem estabilizados o valores das medições. Estas Massas foram consideradas como a massa seca ( $m_s$ ), conforme Tabela 1. Os valores de teores de umidade foram calculados utilizando-se a Equação (1):

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

Em que  $m_i$  é a massa inicial da madeira, em gramas, e  $m_s$  é a massa da madeira seca, em gramas,  $U(\%)$  é o teor de água, dado em percentagem.

Tabela 1 - Teor de água dos corpos-de-provas.

Corpo-de-Prova	$m_i$ (g)	$m_2$ (g)	$m_3$ (g)	$m_4$ (g)	$m_5$ (g)	$m_6$ (g)	$m_7$ (g)	$U(\%)$
CP1	40,56	25,89	23,93	23,85	23,78	23,72	23,74	<b>70,99</b>
CP2	43,11	26,62	24,55	24,43	24,33	24,23	24,26	<b>77,91</b>
CP3	40,69	26,63	24,53	24,42	24,33	24,3	24,3	<b>67,44</b>

Fonte: Do autor (2015)

A média dos valores de percentagem dos teores de água dos corpos-de-prova da madeira cafeeira foi de 65,68 %.

### 3.4.1.2 Massa específica

No laboratório de Química da Madeira, foi realizada a medição e cálculo da massa específica de cinco corpos-de-provas de madeira cafeeira, com dimensões 2cm x 2cm x 10cm.

O procedimento de cálculo da massa específica foi baseado na medida de volume do corpo-de-prova submerso em água, pelo método da deslocação da água. Determinou-se a massa inicial dos corpos-de-provas com exatidão de 0,01 g e a massa do Becker com água. Posteriormente, os corpos-de-provas foram saturados na cuba a vácuo, conforme Figura 36, e medidas suas massas saturadas ( $m_{\text{sut}}$ ).

Figura 36 - Cuba de Vácuo contendo amostra de tronco cafeeiro.



Fonte: Do autor (2015)

Após a determinação da massa saturação ( $m_{\text{sut}}$ ), os cinco corpos-de-prova foram submersos em água destilada contida em um Becker. Determinaram-se as massas dos corpos-de-prova, submersos em uma balança analítica, conforme Figura 37.

Figura 37 - Balança de precisão e becker com água destilada, com amostra do tronco cafeeiro.



Fonte: Do autor (2015)

O valor 1182,82g foi obtido da medição do peso do Becker com a água destilada, considerando a massa específica da água igual  $1 \text{ g.cm}^{-3}$  e a aceleração da gravidade igual a  $9,789 \text{ m.s}^{-2}$ .

Após a determinação da massa submersa ( $m_{\text{sub}}$ ), os cinco corpos-de-prova foram colocados, na câmara de secagem, estufa com circulação mecânica MOD 320 E com a temperatura de  $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Foram medidas as massas dos corpos-de-prova, durante a secagem das massas iniciais, a cada 6h, até serem estabilizados os valores das medições. Determinaram-se as massas secas ( $m_s$ ) dos corpos-de-prova, por meio de uma balança analítica e os valores de densidade aparente foram calculados utilizando a Equação (2):

$$p = \frac{m_s}{V_{\text{sat}}} \quad (2)$$

Em que  $P$  é a massa específica ( $\text{g.cm}^{-3}$ ),  $m_s$  é a massa da madeira seca, em gramas e o  $V_{\text{sat}}$  é o volume saturado,  $\text{cm}^3$ .

Os valores, obtidos dos ensaios de determinação da massa específica, estão apresentados nas Tabelas 2 e 3. Em que  $m_i$  é a massa inicial do corpo-de-prova,  $m_{sat}$  é a massa saturada do corpo-de-prova,  $m_{sub}$  é a massa submersa do corpo-de-prova, e  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$  são as massas medidas durante a secagem dos corpos-de-prova.

Tabela 2 - Massas dos Corpos-de-Prova.

Massa	Corpo-de-prova 1	Corpo-de-prova 2	Corpo-de-prova 3	Corpo-de-prova 4	Corpo-de-prova 5
$m_i$ (g)	40,70 g	43,85 g	41,26 g	41,66 g	43,09 g
$m_{sat}$ (g)	44,40 g	45,92 g	45,44 g	45,02 g	44,76 g
$m_{sub}$ (g)	36,92 g	37,89 g	38,07 g	37,73g	37,64g
$m_1$ (g)	29,36 g	31,34 g	29,51 g	30,17 g	29,55g
$m_2$ (g)	22,86 g	24,15 g	23,46 g	23,55 g	23,59 g
$m_3$ (g)	22,78 g	24,04 g	23,37 g	23,46 g	23,45 g
$m_4$ (g)	22, 80 g	24,04 g	23,38 g	23,47 g	23,48g

Tabela 3 - Massa específica dos Corpos-de-prova.

Massa	Corpo-de-prova 1	Corpo-de-prova 2	Corpo-de-prova 3	Corpo-de-prova 4	Corpo-de-prova 5
$m_{sub}$ (cm <sup>3</sup> )	36,92	37,89	38,07	37,73	37,64
$m_{seca}$ (g)	22,78	24,04	23,37	23,46	23,45
Massa específica (g.cm <sup>-3</sup> )	0,6170	0,6344	0,6138	0,6217	0,6230

Fonte: Do autor (2015)

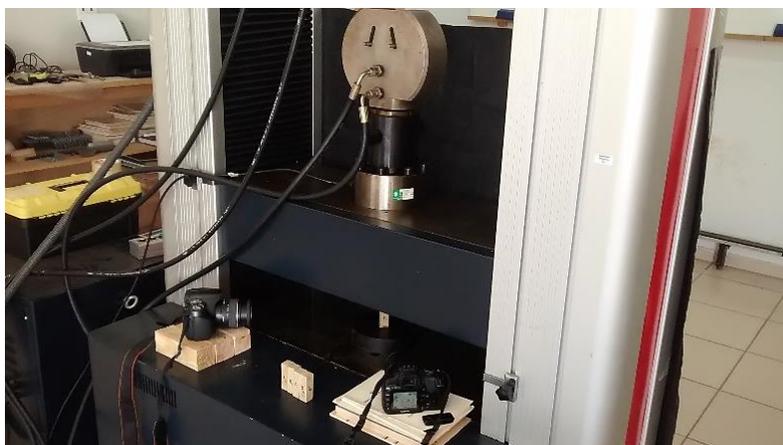
### 3.4.2 Ensaio Mecânicos

Os ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos, no Departamento de Engenharia Agrícola, na determinação das propriedades mecânicas da madeira cafeeira: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e limite de escoamento.

#### 3.4.2.1 Módulo de Elasticidade e Limite de escoamento

No laboratório de Ensaio Mecânicos, foram realizados os testes de compressão paralela às fibras da madeira cafeeira (FIGURA 38).

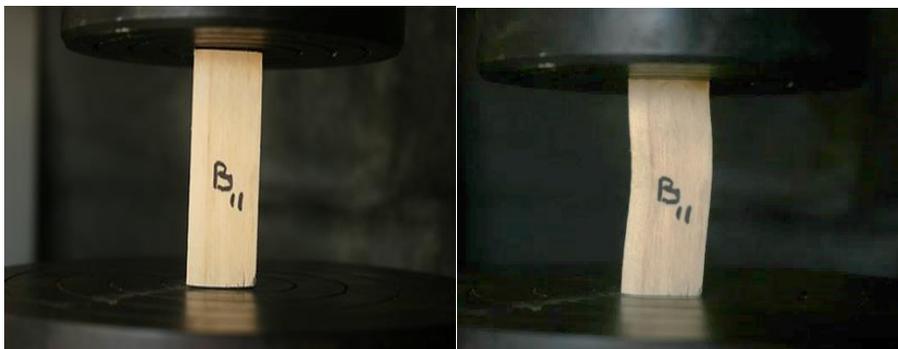
Figura 38 - Máquina Universal de Ensaio “LOS”.



Fonte: Do autor (2015)

Foram confeccionados, primeiramente, seis corpos – de – prova da madeira cafeeira, com as dimensões de 20 mm com secção transversal quadrada e constante e 60 mm de comprimento, extraídos das plantas de café, coletadas em campo, para realização dos testes de compressão paralela às fibras, ensaiados na Máquina Universal de Ensaio “LOS”, com capacidade de 400.000 N (FIGURA 39).

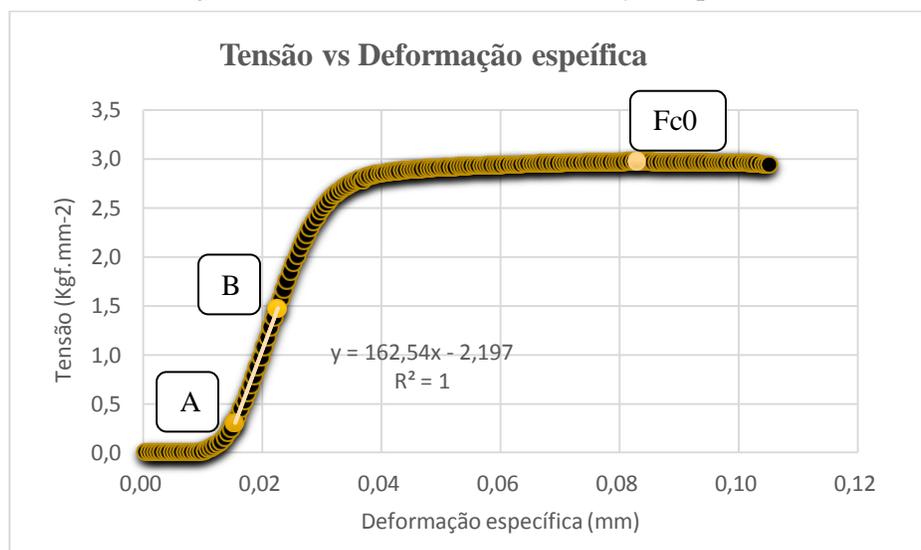
Figura 39 - Corpo-de-prova B.



Fonte: Do autor (2015)

Os ensaios de compressão paralela às fibras dos corpos-de-prova da madeira cafeeira foram realizados, obtendo-se o diagrama de tensão versus deformação específica, para cada corpo-de-prova, conforme exemplo apresentado na Figura 40.

Figura 40 - Gráfico Tensão x Deformação Específica.



Fonte: Do autor (2015)

O módulo de elasticidade foi obtido da reta de inclinação secante a curva de tensão versus deformação específica, definido nos pontos de 10% (A) e 50 % (B) da resistência à compressão paralela às fibras, de acordo com a norma 7190 (ABNT,1997).

Os valores do módulo de elasticidade foram calculados, utilizando a Equação (3), de acordo com a norma NBR 7190 (ABNT,1997).

$$Ec0 = \frac{\alpha_{50\%} - \alpha_{10\%}}{\beta_{50\%} - \beta_{10\%}} \quad (3)$$

Em que  $Ec0$  é módulo de elasticidade ( Kgf.mm<sup>-2</sup>);

$\alpha$  é a tensão de compressão paralela às fibras ( Kgf.mm<sup>-2</sup>);

$\beta$  é a deformação específica (mm/mm);

Os valores de tensões definidas nos pontos de  $\alpha$  50% e  $\alpha$  10% da máxima força de compressão ( $Fc0$ ), com suas respectivas deformações específicas,  $\beta_{50\%}$  e  $\beta_{10\%}$ , estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Tensão x Deformação Específica.

Tensão ( $\alpha$ )	Kgf. mm <sup>-2</sup>	Deformação Esp. ( $\beta$ )	Deformação Esp. (mm/mm)	Mod. Elasticidade (Kgf.mm <sup>-2</sup> )
$\alpha$ 10%	0,3021	$\beta_{10\%}$	0,0154	
$\alpha$ 50%	1,4737	$\beta_{50\%}$	0,0226	164,79
$Fc0$	2,9697	$Bfc0$	0,0803	

Fonte: Do autor (2015)

Os cálculos do módulo de elasticidade foram para os seis corpos-de-prova: (A, B, C, D, E e F), estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Módulo de Elasticidade

Corpo-de-prova	Mod. Elasticidade (Kgf.mm <sup>-2</sup> )	Mod.Elasticidade (N.mm <sup>-2</sup> )
A	180,44	1.769,55
B	164,79	1.616,05
C	172,67	1.693,30
D	245,89	2.411,38
E	228,07	2.236,57
F	257,18	2.522,05
<b>Média</b>	<b>208,17</b>	<b>2.041,48</b>

Fonte: Do autor (2015)

A média dos valores do módulo de elasticidade do lote de corpos-de-provas da madeira cafeeira foi de 208,17 Kgf.mm<sup>-2</sup> ou 2041,48 N.mm<sup>-2</sup>, o limite de escoamento teve seu valor médio de 3,0669 kgf.mm<sup>-2</sup> (Tabela 6).

Tabela 6 - Limite de Escoamento.

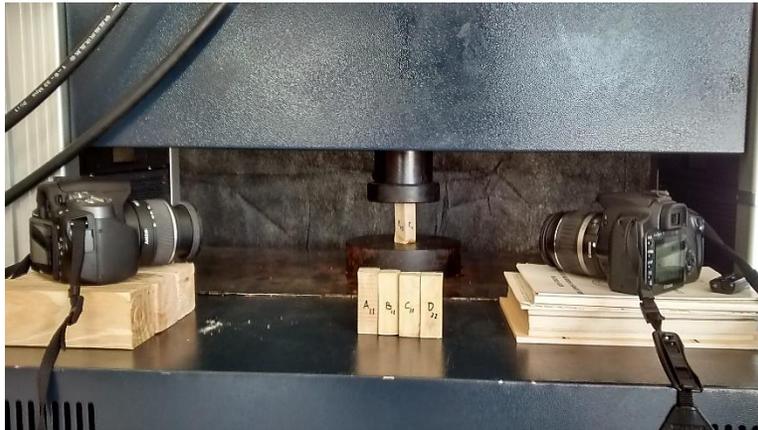
Corpo-de-Prova	Limite de Escoamento
A	28,3128
B	29,1228
C	29,2797
D	31,7696
E	29,3552
F	32,6179
<b>Média</b>	<b>30,0760</b>

Fonte: Do autor (2015)

### 3.4.2.2 Coeficiente de Poisson

Na determinação do coeficiente de Poisson, foi realizado um procedimento de análise de imagens dos corpos-de-prova, com uso de software específico (ImageJ), as quais foram capturadas por câmeras fotográficas de alta resolução, durante os testes de compressão paralela às fibras da madeira cafeeira, no Laboratório de Ensaios Mecânicos, do Departamento de Engenharia Agrícola (FIGURA 41).

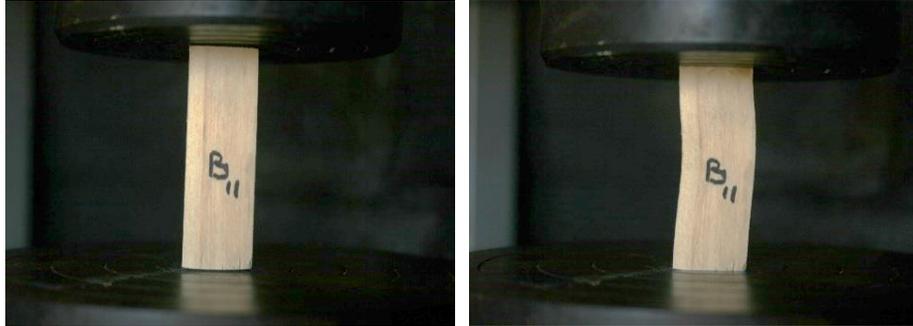
Figura 41 - Setup dos testes de compressão na máquina universal de ensaios.



Fonte: Do autor (2015)

Duas câmeras fotográficas foram utilizadas na captura de imagens, uma do fabricante Canon, modelo EOS DIGITAL REBEL XT<sub>i</sub> e outra do fabricante SONY, modelo DSLR-A330, dispostas nas laterais da plataforma da Máquina Universal de Ensaios, focalizaram -se duas faces de cada corpo-de-prova, conforme as Figuras 42e 43.

Figura 42 - Corpo-de-prova B, face B11



Fonte: Do autor (2015)

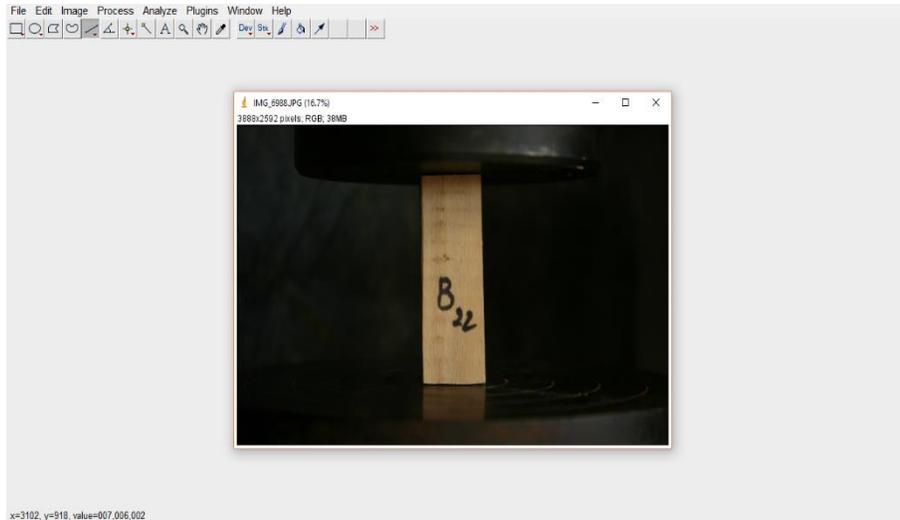
Figura 43 - Corpo-de-prova B, face B22.



Fonte: Do autor (2015)

O cálculo do coeficiente de Poisson foi realizado com captura de imagens dos corpos-de-prova, correspondente à reta secante à curva do diagrama tensão versus deformação específica, utilizada na determinação do módulo de elasticidade. Os arquivos das imagens capturadas de cada corpo-de-prova foram processados no software livre ImageJ (FIGURA 44).

Figura 44 - Imagem da amostra do tronco cafeeiro ImageJ.



Fonte: Do autor (2015)

No software ImageJ, foram realizadas as medições da variação das dimensões da secção transversal e do comprimento dos corpos-de-provaorva, utilizados, durante os ensaios de compressão paralelo às fibras, por meio da diferença de coordenadas de pixels da imagem, conforme as Tabelas 6, 7 e 8.

Tabela 7 - Cálculo do Coeficiente de Poisson.

Tensão Kgf.mm <sup>-2</sup>	Tempo (s)	Foto B11	Tensão Kgf,mm <sup>-2</sup>	Tempo (s)	Foto B11		
10%	0,3021	27,995	50%	1,4737	40,995		
		IMG7003			IMG7004		
Ponto Inicial		Ponto Final		Ponto Inicial		Ponto Final	
X	1943	X	1943	X	1943	X	1943
Y	365	Y	2147	Y	370	Y	2149
				1782			1779
$\epsilon_y = (y-y_0)/y_0 = 0,00168$							

Tabela 8 - Coeficiente de Poisson.

<b>A</b>	Coef. Poisson Total $\epsilon = \text{del}(x)/\text{del}(y)$	0,47554
<b>B</b>	Coef. Poisson Total $\epsilon = \text{del}(x)/\text{del}(y)$	0,43323
<b>C</b>	Coef. Poisson Total $\epsilon = \text{del}(x)/\text{del}(y)$	0,24689
<b>D</b>	Coef. Poisson Total $\epsilon = \text{del}(x)/\text{del}(y)$	0,29461
<b>E</b>	Coef. Poisson Total $\epsilon = \text{del}(x)/\text{del}(y)$	0,45310
<b>F</b>	Coef. Poisson Total $\epsilon = \text{del}(x)/\text{del}(y)$	0,32248
<b>Média</b>	<b>Coef. Poisson Total</b> <b><math>\epsilon = \text{del}(x)/\text{del}(y)</math></b>	<b>0,37097</b>

Fonte: Do autor (2015)

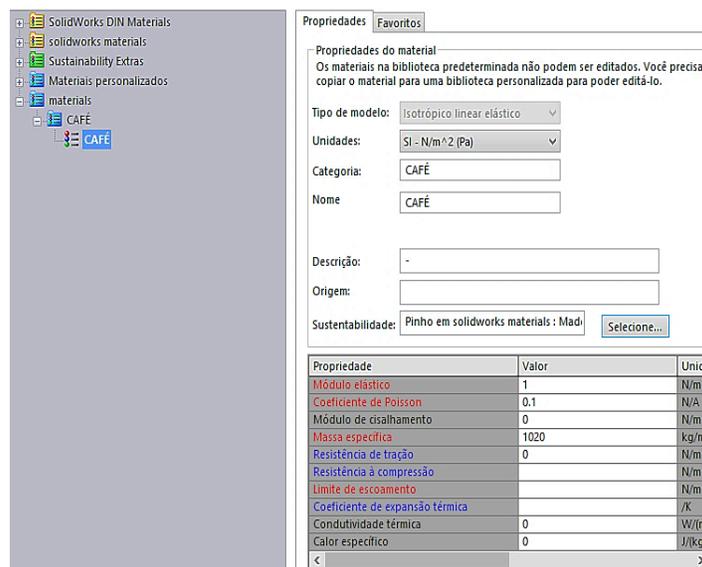
## 4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

O modelo geométrico tridimensional da árvore cafeeira foi desenvolvido após as etapas anteriores. Esta etapa consistiu em realizar simulação numérica computacional, via método de elementos finitos, no desenho geométrico da árvore cafeeira em três dimensões, por meio do programa comercial SolidWorks 2013 da SolidWorks Corporation.

O arquivo gerado do modelo computacional da árvore cafeeira foi salvo no formato (STL) e exportado, para um sistema CAD (Computer Aided Desing), neste caso, o software comercial SolidWorks, versão 2013.

No ambiente do software SolidWorks2013, na Biblioteca de materiais (FIGURA 45), em materiais personalizados, criou-se uma Biblioteca para madeira cafeeira e foram inseridos dados aleatórios, nas propriedades físico-mecânicas da madeira cafeeira, requeridas para a simulação numérica de esforços, no modelo tridimensional do cafeeiro.

Figura 45 - Biblioteca do SolidWorks2013.

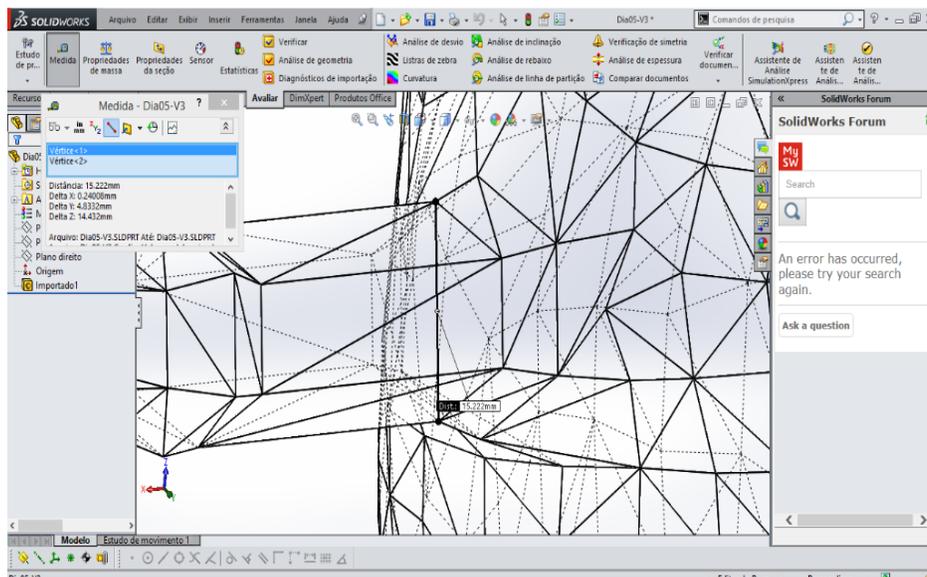


Fonte: Do autor (2015)

Os valores dos dados das propriedades físico-mecânicas do material (madeira cafeeira) foram inseridos, sendo estes necessários para simulação numérica. As propriedades físico-mecânicas do material, requeridas pelo programa Solidworks13 foram: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, massa específica e limite de escoamento.

No software SolidWorks2013, o modelo computacional da árvore cafeeira, desenvolvido no software Blender 3D, apresentou-se uma malha geométrica fechada por completo (FIGURA 46), formando o desenho geométrico da árvore cafeeira, em três dimensões um sólido, essencial para realizar os testes experimentais de simulação numérica.

Figura 46 - Modelo Tridimensional da árvore cafeeira, SolidWorks2013.

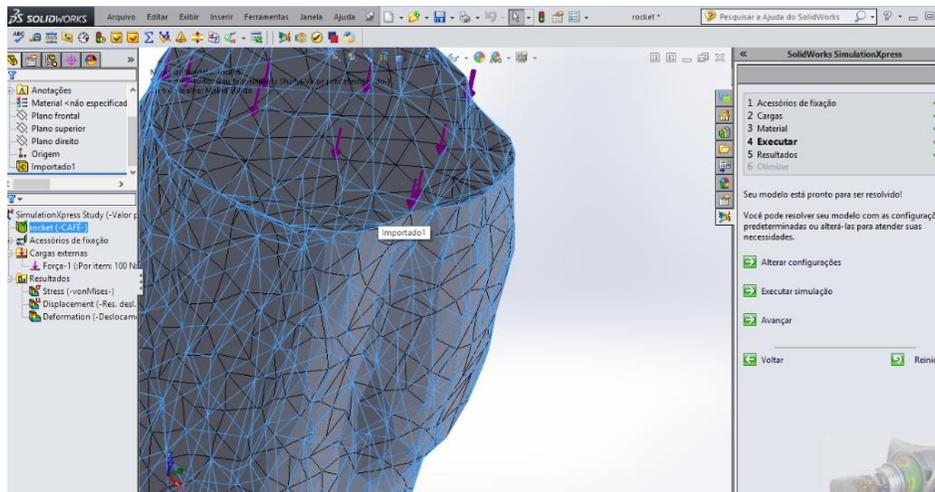


Fonte: Do autor (2015)

A malha geométrica computacional, gerada pela simulação numérica, diferencia-se da malha geométrica do modelo tridimensional da planta cafeeira.

A malha, gerada pelo programa SolidWorks, no modelo computacional da estrutura lenhosa da árvore cafeeira, para realização da simulação numérica, apresentou-se no sólido do modelo geométrico cafeeiro, áreas discretizadas menores do que as áreas discretizadas da malha geométrica que formam o desenho geométrico do modelo computacional, conforme Figura 47.

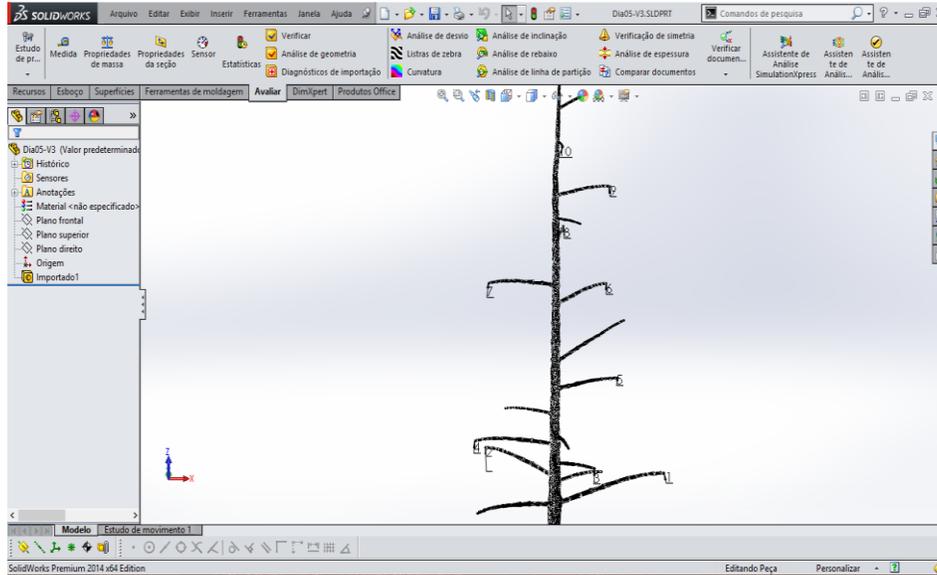
Figura 47 - Malha geométrica de simulação no modelo computacional do cafeeiro



Fonte: Do autor (2015)

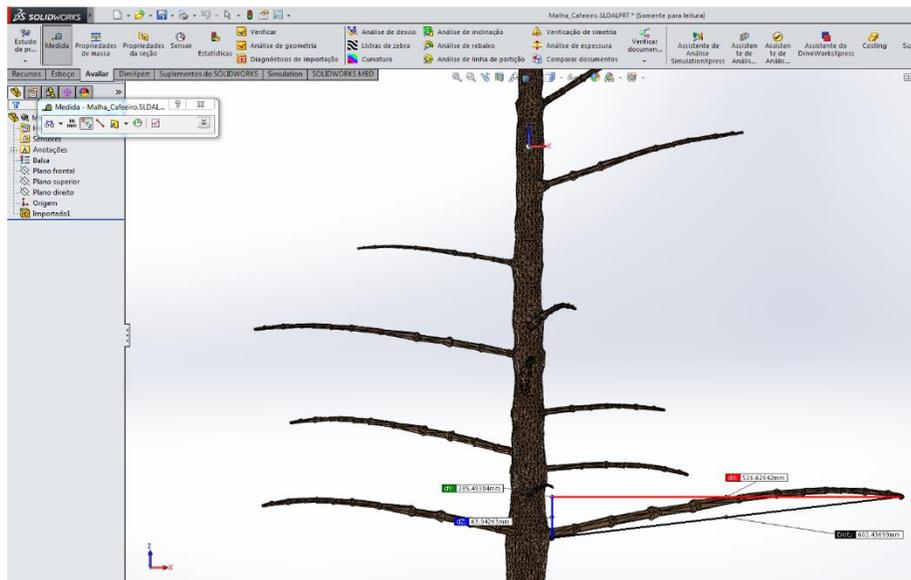
Por fim, iniciaram -se os testes experimentais de simulação numérica no modelo computacional da estrutura lenhosa da árvore cafeeira. Aplicaram - se esforços nos testes experimentais de carregamento e restrição. Como representação (FIGURAS 48 e 49), foi aplicado um esforço de 1 N e 0,5 N, nos ramos plagiotrópicos do modelo geométrico tridimensional.

Figura 48 - Modelo Tridimensional da árvore cafeeira, SolidWorks2013.



Fonte: Do autor (2015)

Figura 49 - Modelo Computacional da estrutura lenhosa cafeeira, SolidWorks2013.



Fonte: Do autor (2015)

## 5 CONCLUSÕES

Do ponto de vista dos resultados desta pesquisa, desenvolveu-se um protocolo de digitalização e modelagem de cafeeiro para fins de simulação numérica. O modelo computacional, gerado da estrutura lenhosa da árvore cafeeira, foi desenvolvido com recursos computacionais disponíveis e foi considerado representativo para as simulações propostas.

Com isso, conclui-se que o método da digitalização tridimensional e os programas de modelagem geométrica utilizados podem possibilitar a geração de modelos virtuais com base em objetos reais, com uma precisão satisfatória. Desta forma, este trabalho pode contribuir para o direcionamento de novas pesquisas científicas, na área de mecanização agrícola, o que contribuirá para o desenvolvimento de novas tecnologias, para os sistemas mecânicos de colheita de café e otimização dos sistemas já existentes, beneficiando de forma direta o setor industrial e o meio agrícola.



## REFERÊNCIAS

ALENCAR, F. A. R. **Concepção e implementação de um scanner 3D para ensino e aprendizagem**. 2010. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.

ASHRAFI, H.; KASRAEI, M.; FARID, M. Boundary element formulation to modeling the viscoelastic constitutive behavior of agricultural structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ENGINEERING, 37.; BRASZILIAN CONGRESS OF AGRICULTURAL ENGINEERING; INTERNATIONAL LIVESTOCK ENVIRONMENTAL, 7., 2008, Foz do Iguaçu. **Abstract....** Wallingford: CABI, 2008. Disponível em: <<http://www.cabdirect.org/abstracts/20093272857.html>> Acesso em: 02 fev. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

BERTOL, L. S. **Contribuição ao estudo da prototipagem rápida, digitalização tridimensional e seleção de materiais no design de implantes personalizados**. 2008. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

BISHOP, N. W. M. Vibration fatigue analysis in the finite element environment. In: ENCUESTRO DEL GRUPO ESPAÑOL DE FRACTURA, 16., 1999, Torremolinos. **Anales...** Madrid: Secretaría del grupo Español de Fractura, 1999. Disponível em: <<https://web.mscsoftware.com/support/library/conf/auto99/p03799.pdf>>. Acesso em: 02 fev. 2016.

BOFANG, Z. Finite element method for computing temperature field. In: \_\_\_\_\_. **Thermal stresses and temperature control of mass concrete**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. chap. 9, p. 185-203.

CALLICOTT, N. **Computer-aided manufacture in architecture**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. chap. 1, p. 3-9.

CARVALHO, J.; VOLPATO, N. Prototipagem rápida como processo de fabricação. In: VOLPATO, N. **Prototipagem rápida**: tecnologias e aplicações. São Paulo: E. Blucher, 2007. cap 1, p. 1-15.

CELIK, H. K.; RENNIE, A. E. W.; AKINCI, I. Deformation behaviour simulation of an apple under drop case by finite element method. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 104, n. 2, p. 293-298, May 2011.

CHANDRASEKAR, V.; VISWANATHAN, R. Physical and thermal properties of coffee. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 73, n. 3, p. 227-234, July 1999.

CHRISTOFORO, L. A.; LAHR, R. A. R. Determinação do módulo de elasticidade longitudinal em estruturas planas de madeira do tipo treliça. **Revista Minerva - Pesquisa & Tecnologia**, São Carlos, v. 4, n. 2, p. 217-224, 2011.

D'ALFONSO, T. H.; KAMATH, S.; PURI, V. M. Agricultural and biological engineering applications of the boundary element method. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 13, n. 2, p. 273-281, Mar. 1997.

FAVARIN, J. L. et al. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p.769-773, jun. 2002.

FERREIRA, J. Integration of reverse engineering and rapid tooling in foundry technology. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 142, n. 2, p. 374-382, Nov. 2003.

FILGUEIRAS, W. H. et al. Propriedades mecânicas da madeira do café. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Anais...** Brasília: Consórcio Pesquisa Café, 2000. p. 1081-1084.

FORTI, N. C. S. et al. Análise de vigas mistas de concreto e madeira pelo método dos elementos finitos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 8, n. 4, p. 507-528 , ago. 2015.

FREITAS, G. **Metodologia e aplicabilidade da digitalização 3D a laser no desenvolvimento de moldes para calçados e componentes**. 2006. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

GALLAGHER, R. H. Introduction. In: \_\_\_\_\_. **Finite element analysis: fundamentals**. 4<sup>th</sup> ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1975. chap. 1, p. 1-19.

HOLMBERG, S.; PERSSON, K.; PETERSSON, H. Nonlinear mechanical behavior and analysis of wood and fibre materials. **Computers & Structures**, Elmsford, v. 72, n. 4/5, p. 459-480, Aug./Sept. 1999.

HUGHES, T. J. R. **The finite element method**: linear static and dynamic finite element analysis. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1987. 704 p.

KNIGHT, C. E. **The finite element method in mechanical design**. Boston: PWS-KENT, 1993. 326 p.

LEE, J. H. et al. Vibrational and dynamic analysis of C60 and C30 fullerenes using FEM. **Computational Materials Science**, New York, v. 56, p. 131-140, Apr. 2012.

LI, Z. et al. Internal mechanical damage prediction in tomato compression using multiscale finite element. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 116, n. 3, p. 639-647, June 2013.

MAGALHAES, A. C. et al. Modelagem de máquina pneumática recolhadora de frutos de café em terreno usando análise por elementos finitos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 483-492, maio/jun. 2006.

MARIJA, R. J. et al. Changes of physical properties of coffee beans during Roasting. **Acta Periodica Technologica**, Novi Sad, v. 43, p. 21-31, 2012.

MURASE, H.; KOYAMA, S.; NAKASAKU, S. Application of the boundary element method to agricultural engineering problems: microcomputer implementation of BEM [the boundary element method]. **Bulletin of the University of Osaka Prefecture. Series B. Agriculture and Biology**, Osaka, v. 35, p. 29-34, 1983.

NEDOMOVÁ, S. et al. Strength of coffee beans under static and dynamic loading. **Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis**, Brno, v. 61, n. 3, p. 743-749, 2013.

NG, S. F.; CHEUNG, M. S.; XU, T. A combined boundary element and finite element solution of slab and slab-on-girder bridges. **Computers & Structures**, Elmsford, v. 37, n. 6, p. 1069-1075, 1990.

NGUYEN-THOI, T. et al. A smoothed coupled NS/nES-FEM for dynamic analysis of 2D fluid–solid interaction problems. **Applied Mathematics and Computation**, New York, v. 232, p. 324-346, Apr. 2014.

NILNONTA, W. et al. Finite element simulation for coffee (*Coffea arabica*) drying. **Food and Bioproducts Processings**, Rugby, v. 90, n. 2, p. 341-350, Apr. 2012.

OGBORN, J.; MILLER, R. Computacional issues in modelling. In: HAVEY, M. et al. (Ed.). **Learning with artificial worlds**: computer based modelling in the curriculum. London: Routledge, 1994. chap. 5, p. 33-38.

OLIVEIRA, R. R. **A utilização da modelagem computacional no processo de ensino e aprendizagem de tópicos de física através da metodologia de módulos educacionais**: uma investigação no ensino médio. 2015. 211 p. Tese (Doutorado em Educação) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

OLUKUNLE, O. J.; AKINNULLI, B. O. Investigating some engineering properties of coffee seeds and beans. **Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences**, Newcastle, v. 3, n. 5, p. 743-747, Oct. 2012.

PIOTR, M.; PIECZYWEK, A. Z. Finite element modelling of the mechanical behaviour of onion epidermis with incorporation of nonlinear properties of cell wall sandreal tissue geometry. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 123, p. 50-59, Feb. 2014.

SAVARY, S. K. J. U. et al. Simulation study of citrus tree canopy motion during harvesting using a canopy shaker. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, St. Joseph, v. 53, n. 5, p. 1373-1381, 2010.

SILVA, E. P.; SILVA, F. M.; MAGALHAES, R. R. Application of finite elements method for structural analysis in a coffee harvester. **Engineering**, Wuhan, v. 6, n. 3, p.138-147, Mar. 2014.

SILVA, F. P. et al. A digitalização tridimensional móvel e sua aplicação no design de produto. **Revista Design e Tecnologia**, Porto Alegre, n. 1, p. 60-65, 2010.

SILVA, F. P. **O uso da digitalização tridimensional a laser no desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao design de produtos**. 2006. 167 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SILVA, J. C.; TARALLI, C. H.; MELZ, S. P. Tecnologias, dispositivos e recursos do escaneamento tridimensional no raciocínio projetual. In: ENCUESTRO LATINOAMERICANO DE DISEÑO, 10., 2015, Buenos Aires. **Actas....** Buenos Aires: Faculd de Diseño Y Comunicación, 2015. v. 20, p. 172-173.

SOKOVIC, M. RE (reverse engineering) as necessary phase by rapid product development. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 175, n. 1/3, p. 398-403, June 2006.

TURNER, M. J. et al. Stiffness and deflection analysis of complex structures. **Journal of the Aeronautical Sciences**, Easton, v. 23, n. 9, p. 805-823, Sept. 1956.

TAKESHI, O. et al. A finite-element method using dispersion reduced spline elements for room acoustics simulation. **Applied Acoustics**, Barking, v. 79, p. 1-8, May 2014.

WALFORD, A. **A new way to 3D scan**. Disponível em: <[http://www.photomodeler.com/downloads/wp\\_mdwnload.htm](http://www.photomodeler.com/downloads/wp_mdwnload.htm)>. Acesso em: 02 fev. 2016.



**SEGUNDA PARTE – ARTIGO****ARTIGO 1 - GEOMETRIC MODELING OF A COFFEE PLANT FOR  
DISPLACEMENTS PREDICTION**

Artigo redigido conforme norma da revista “Computers and Electronics in Agriculture”, em que foi submetido e aprovado para publicação no volume 123 de 2016 (págs. 57-63).

**Abstract:** Coffee plants can present structural problems during semi-mechanized and mechanized harvesting such as excessive defoliation and breaking branches. For this reason, studies of mechanical response of a coffee plant can help the development of more optimized machines. The main objective of this study is the modeling of a coffee plant for its mechanical behavior evaluation by using the Finite Element Analysis. The presented paper includes modeling, numerical simulations and experimental tests from a *Coffea arabica* L. plants. Firstly, it was necessary to create a coffee tree geometry based on pieces of a real tree using 3D scanning process. The coffee tree geometry together with experimental data provided materials properties of the wood plant which are used for displacements prediction via Finite Element Analysis. In order to validate the methodology, simulated results were compared to a real plant behavior under static load. Results presented consistent values from the three-dimensional modeling of a coffee plant which demonstrated the potentiality for new applications.

**Keywords:** plant mechanical behavior; numerical simulations; digital scanning

## INTRODUCTION

The coffee industry is discovering the advantages and benefits of knowing the operational characteristics of a product by means of numerical simulation which is a technology that multiplies in most of engineering departments (Silva et al., 2014). The increasing of coffee consumption in contrast to the unavailability of hand labor for manual harvesting generates the need for mechanized harvesting. In this scenario, the numerical simulation can be used to predict the mechanical behavior of the machines as well as coffee plants.

Numerical simulations performed by Finite Element Analysis (FEA) are common used for predicting the mechanical behavior of metallic, non-metallic and organic materials (Celik et al., 2011; Li et al., 2013; Nilnonta et al., 2012; Tinoco et al., 2014; Santos et al., 2015). Numerical simulation can predict physical tests and generate reports with satisfactory results. Therefore the numerical simulation is a basic tool for engineers and researchers that directly address problems facing on the industries and academic areas.

In this context, numerical simulations have fundamental importance for the solution of two and three-dimensional problems when compared to limited solutions by conventional methods. Three-dimensional behavior of components under mechanical stresses needs to be analyzed with accuracy due to geometry complexity. Bishop (1999) states that regardless of the situation which the component is subjected it can be analyzed through FEA. This also generates results even in the design phase of a project.

It is known that, in numerical simulations, as much as complete the analysis, higher is the degree of complexity and, consequently, greater the difficulty in obtaining an adequate solution. However, with the advance of new computational technologies, scientists and engineers have more access to equipments with high processing capacity. This contributes to the improvement of numerical methods, enabling the development of algorithms that allow numerical simulations with accuracy.

Among the existing numerical methods, FEA consists of subdivision (discretization) of a geometric domain in small areas or volumes, named by the finite element mesh (Knight, 1993). From each discretized volume, stresses and displacements among other results in the entire model are

provided (Savary et al., 2010). The emergence of FEA was performed through the aerospace industry (Turner et al., 1956). With increasing computer processing power, workstations and reduction in the cost thereof, FEA has become common in many engineering areas, mainly in acoustic (Takeshi et al., 2104), thermal (Bofang , 2014) and dynamics (Nguyen-Thoi et al., 2014; Lee et al., 2012).

In agriculture, FEA can be used as a simulation tool in the mechanical behavior of fruits and vegetables (Piotr and Pieczywek, 2014) and also in the harvesting mechanization (Magalhães et al., 2006). Other numerical methods have also been applied in agricultural engineering such as the Boundary Element Method (D'Alfonso et al., 1997), but FEA is still mostly used in agriculture, mainly for soil applications (Tagar et al., 2015) and vibrations (Zhao et al., 2015). More specifically, there are published studies to determine the mechanical properties of coffee (Chandrasekar and Viswanathan, 1999; Olukunle and Akinnuli, 2012; Cilas et al., 2010), but the geometric modeling of a coffee tree for static and dynamic analysis using FEA is still incipient.

Considering that mechanized coffee harvesting has performed by mechanical vibrations and that the harvesting machines interact with

whole plant, it is fundamental to study the static and dynamic behaviors of the coffee fruit-stem system, plagiotropic branches and orthotropic branch. Machines that use this principle employ a combination of loads, frequency and amplitude to detach the fruits (Ciro, 2001; Santos et al., 2010). The determination of modal properties of fruit-stem systems is an essential parameter for developing mechanized process and has been explored by many authors (Ciro 2001; Tinoco et al. 2014; Santos et al. 2015). However understanding the static behavior of the coffee plant is also necessary for a complete model of the system, including all parts of the plant. In this context, this paper is aimed to perform the modeling of a coffee tree by using 3D scanning process in order to perform static analysis by means of numerical simulations.

## **MATERIALS AND METHODS**

### **Plant geometry modeling**

The three-dimensional modeling of plants is the first step to evaluate the mechanical behavior of the wood by means of numerical simulations. For this, it is necessary obtain the architecture of the plant from 3D Laser

such as Preuksakarn et al. (2010). In the case of this work, trunk and branches have been geometrically patterned by using free software (Blender<sup>®</sup>). The complete geometrical modeling of the coffee plant followed some procedures which included the pull out of the plant, defoliation and sawing the plant in pre-determined parts.

In order to carry out a coffee plant modeling, parts of the trunk and branches of *Coffea arabica* L. (IAC 144) plant were provided separately for scanning (Figure 1).

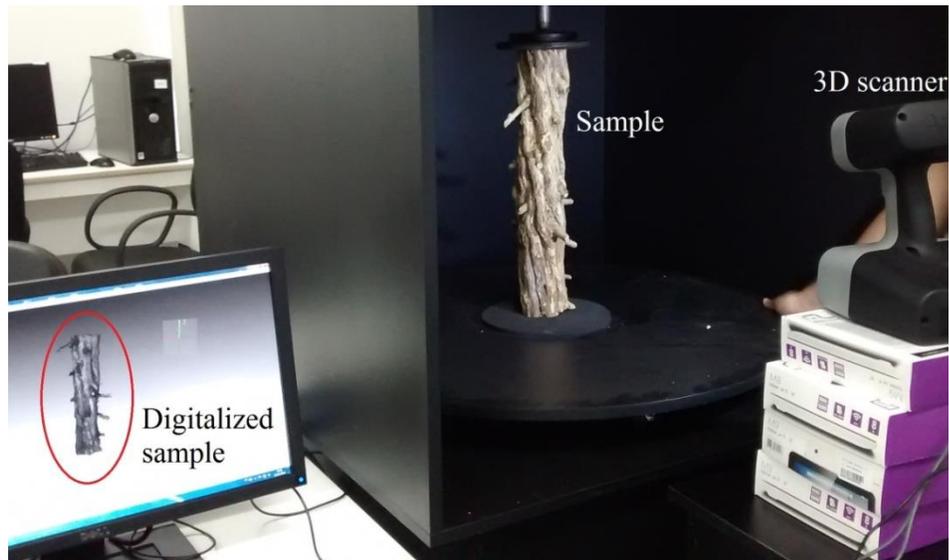


Figure 1. Part of a trunk coffee plant under scanning process

After all parts scanning, they were joined in the software Blender<sup>®</sup> and the entire plant was modeled, Figure 2.

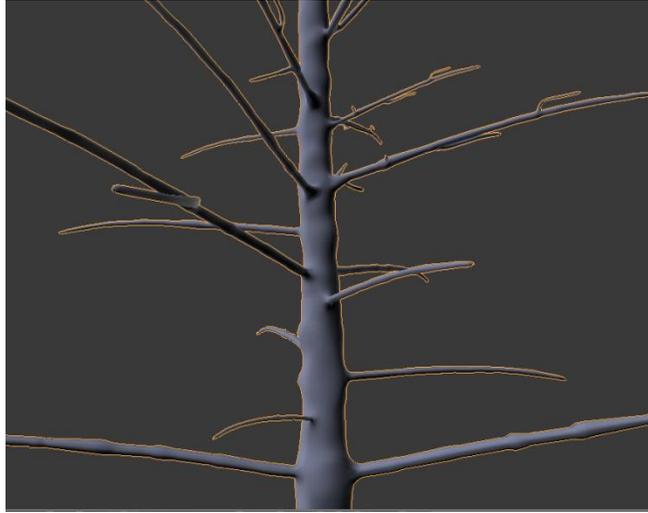


Figure 2. Entire coffee plant geometry composed by scanned parts

### **Mechanical properties of the plant**

From coffee plant samples, two main mechanical properties (modulus of elasticity and Poisson's ratio) were evaluated from compression tests in a universal testing machine. The experiments from the wood of coffee plant samples were performed according to standard NBR 7190 (ABNT, 1997). Fifteen trunk samples from different coffee plants with squared cross section of 20 mm each side and 60 mm in length were tested. Figure

3 presents one trunk sample of a coffee plant under compression in a universal testing machine.

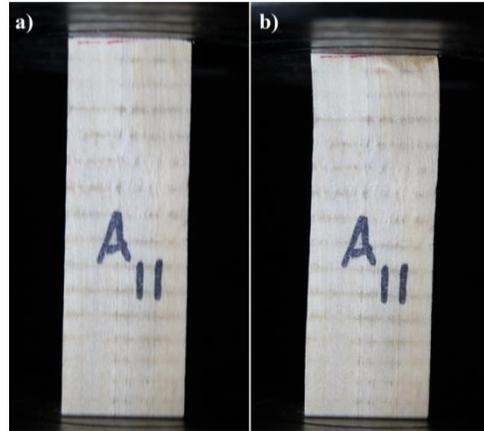


Figure 3. Coffee wood plant sample (a) before and (b) after compression test

A free software (Image J<sup>®</sup>), normally used for image processing, was used to obtain Poisson's ratio values. For this, one picture before compression test (Figure 3.a) has been taken as reference. After load application, other picture (Figure 3.b) has been also taken. Width difference from both pictures was calculated using the software Image J<sup>®</sup> by means of digital processing in order to define Poisson's ratio for each sample.

By means of Archimedes immersion method, the density of coffee wood plant samples has been also evaluated, Figure 4.

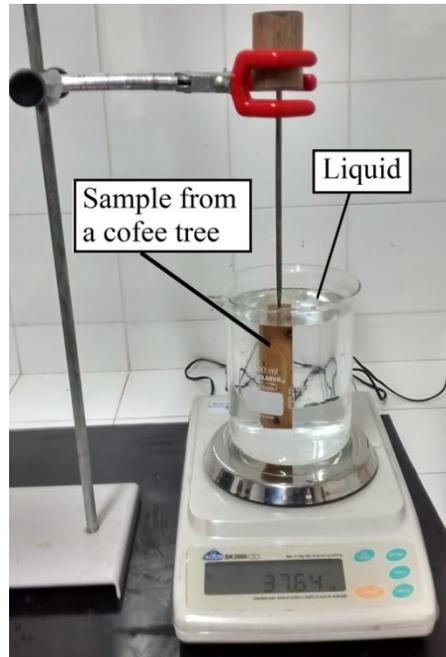


Figure 4. Archimedes immersion method for density determination

Density, modulus of elasticity and Poisson's ratio data from experiments and the coffee plant geometry are mandatory parameters for performing the numerical simulations. Those data were considered as inputs for the FEA commercial software (Solidworks<sup>®</sup>) and the expected outputs are branches displacements.

### Theoretical background

In order to run the FEA, it was necessary first to generate the mesh (discretized model) from the coffee plant geometry. This process covers the three dimensional geometric model subdivision in small volumes which consists in elements and nodes. By applying external loads to the model, some nodes may change its position causing elastic deformations in the model. Elastic deformation vector  $\{\varepsilon\}$ , represented by Equation 1, is determined from the nodal displacements ( $u$ ,  $s$ ,  $w$ ), calculated by the Finite Element Model used in the simulation.

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy} \varepsilon_{zz} \varepsilon_{xy} \varepsilon_{xz} \varepsilon_{yz}\} \quad (1)$$

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

$$\varepsilon_{yz} = \frac{\partial s}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}.$$

From nodal displacements, normal stresses and shear stresses (Equation 2) were calculated using the elastic deformation vector  $\{\varepsilon\}$ . For that, it was employed the linear theory of elasticity.

$$\{\sigma\}^T = \{\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{zz} \sigma_{xy} \sigma_{xz} \sigma_{yz}\} \quad (2)$$

where  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$  are normal stresses and  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{xz}$ ,  $\sigma_{yz}$  are shear stresses.

Generalized Hooke's Law was applied to determine the stresses which the system was submitted, according Equation 3.

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (3)$$

where  $[D]$  is the material matrix composed by information about mechanical properties of the system (modulus of elasticity and Poisson ratio).

When external loads are applied to the nodes or elements, they act to the model according to Equation 4.

$$\{F\} = [m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} \quad (4)$$

where  $\{F\}$  is the external load vector,  $[m]$  is the mass matrix,  $[c]$  is the damping matrix,  $[K]$  is the stiffness matrix,  $\{x\}$  is the displacement vector,  $\{\dot{x}\}$  is the velocity vector and  $\{\ddot{x}\}$  is the acceleration vector.

Assuming a static system without damping, Eq. (1) can be rewritten by means of the Equation (2).

$$\{F\} = [K]\{x\} \quad (5)$$

### **Simulations setup and validation**

By knowing the external load  $\{F\}$  and the stiffness matrix  $[K]$ , which is a function of material mechanical properties and geometric properties of the system, one obtains simulated displacements. Figure 5 represents the scanned geometry of the coffee plant, including clamping location and external loads applied in a plant branch in vertical direction for performing simulations.

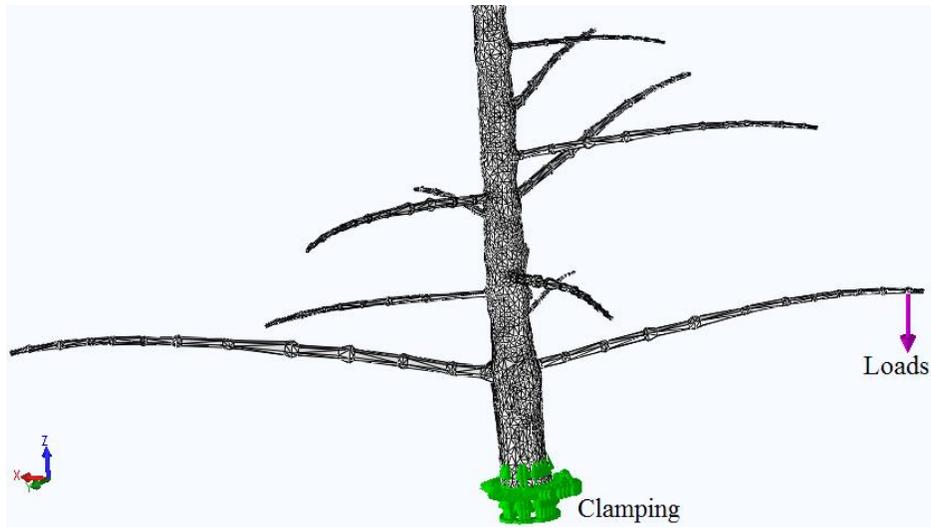


Figure 5. Scanned geometry of the coffee plant with clamping and loads

The direction of the loads was defined following the same experiments procedure (Figure 6), performed for methodology validation.

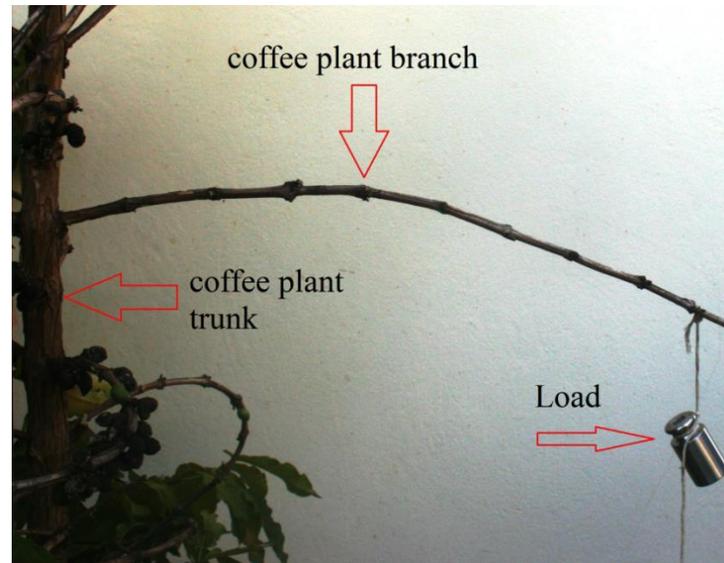


Figure 6. Experimental procedure adopted for validation of simulations

External loads and their magnitude criterion were based on approximate minimum value for detachment force of coffee fruits according to experiments performed by Silva et al. (2010). Based on that, a load of 1.0 N was applied to one branch and an additional load (0.5 N) was also applied in order to validate the experiments. In order to perform the experiments and simulations, ten branches were chosen and numbered according to the Figure 7.

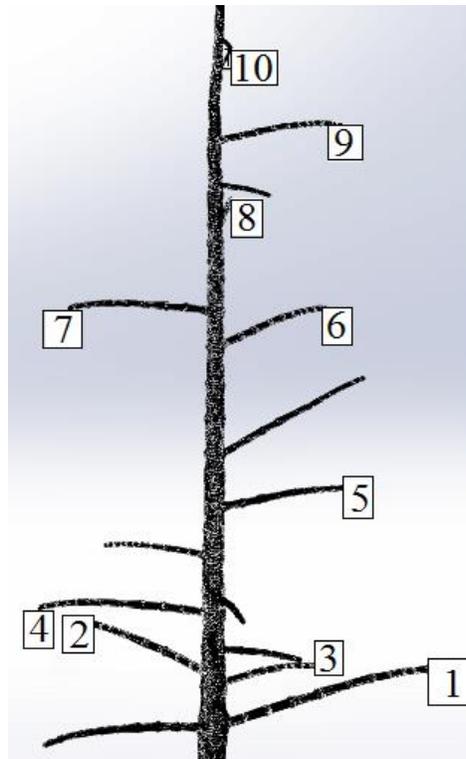


Figure 7. Coffee tree branches numbering

Automated discretization of the coffee plant geometry was performed using the Solidworks<sup>®</sup> Simulation commercial package. Each element of the model had a tetrahedron shape (10 nodes per element) which firstly generated a total of 87007 nodes and 50527 elements with a size of approximately 6.7 mm each. In order to verify the reliability of the numerical analysis, convergence study was performed in the branch #1

using the same load (1 N) and choosing the maximum value of stress versus the element size of the branch, Figure 8.

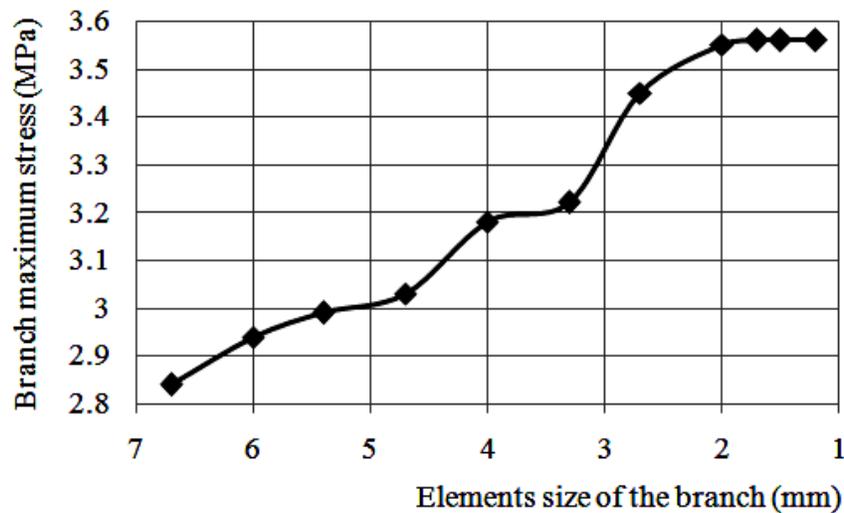


Figure 8. Convergence analysis from a branch #1

During remeshing process, it was noted that refining elements in the model, displacements results change slightly as result of the linear solution. Smaller elements tend to a better model in small regions of high stress gradient as result of stress concentration at the base of the branches. Since the area of interest in this work was on the tips of branches where higher displacements occurred, branches refinement slightly affected the

results. Anyway, branches meshes were refined considering an element approximately 2 mm size, Figure 9.

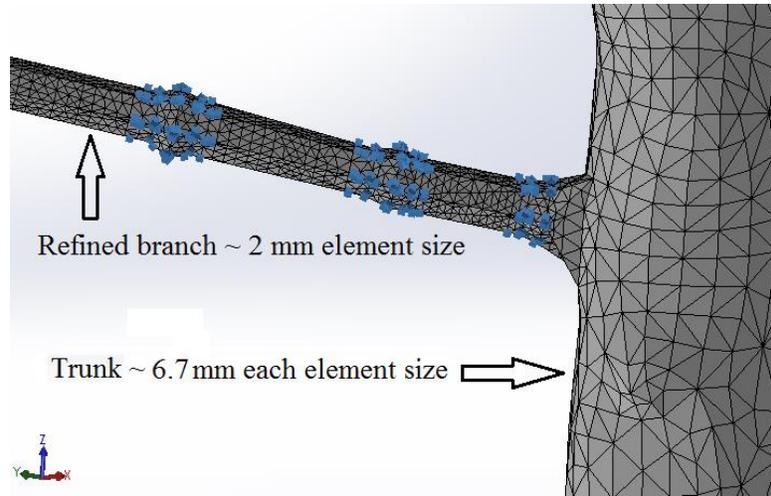


Figure 9. Remeshed branche for simulations

## RESULTS

For simplification, a linear, homogeneous and isotropic material was considered for the simulations. It means that Poisson's ratio and the modulus of elasticity can be calculated using the Hooke's law by means of the stress–strain curve obtained from the experiments, Figure 10.

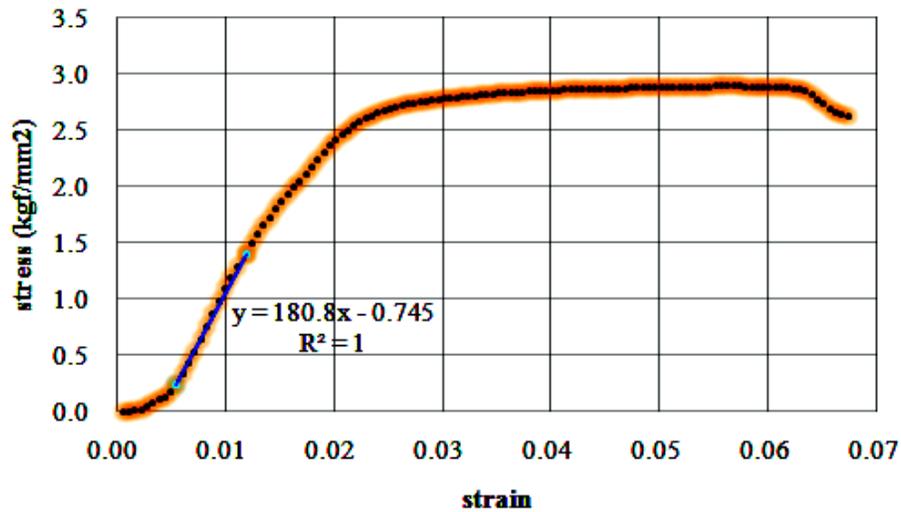


Figure 10. Stress–strain curve from a coffee plant sample

Table 1 shows mean results (Poisson's ratio, modulus of elasticity and density) from the coffee plant samples used as input data for the FEA simulations.

Table 1. Mean and standard deviation from the coffee plant samples properties

Mechanical properties	Poisson's ratio	Modulus of elasticity (MPa)	Density (kg m <sup>-3</sup> )
$\mu \pm s$	$0.37 \pm 0.1$	$2041.5 \pm 326.1$	$607 \pm 35.8$

Based on experimental results, FEA model was generated with material properties included and the simulations were performed. Figure 11 and Figure 12 show simulated displacement results from a static load of 0.5 N and 1.0 N, respectively, applied to a branch.



Figure 11. Simulated displacements in the branch #1 (0.5 N)

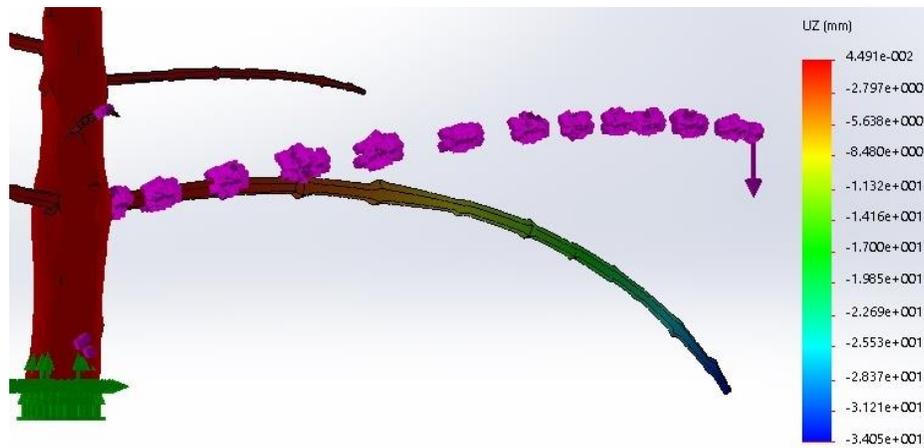


Figure 12. Simulated displacements in the branch #1 (1.0 N)

In the experiments, one picture from the branches was captured by a CCD camera before the load application. The second image was similar to the first one, but considering the displacement of the branch by introducing the load. The difference of the branches position in the pictures (before and after the load application) was provided by digital image processing software in pixels. Displacement values were converted to millimeters by knowing the total length of the branches.

Considering the displacement values from the experiments, it is observed a difference around 20% at the shorter branch (#10) while the longest branch (#1) presented a difference around 54% (Figure 13 and Figure 14). These differences can be explained due to the influence of the

stiffness caused by the large deflections which is an important factor that may influence the results. Large deflections imply that the stiffness of branches changes with the displacements. For this reason, large deflection was included in the analysis. The differences between simulated results and observed results can also be explained by variability of the physical properties of system, once coffee plant response depends directly of the physical properties (Santos et al. 2015). This behavior was described by other authors during the study of the coffee plant systems, such as fruit-stem system (Ciro, 2001; Tinoco et al. 2014).

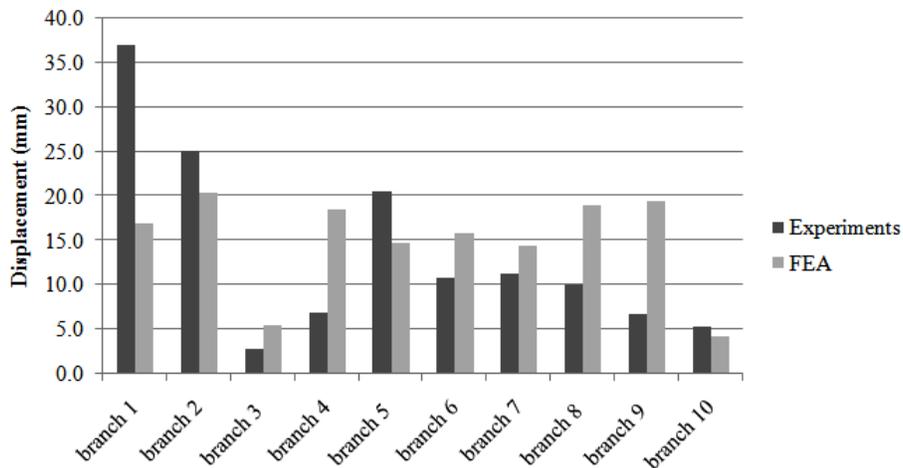


Figure 13. Experimental vs. simulated (FEA) results for the load of 0.5 N

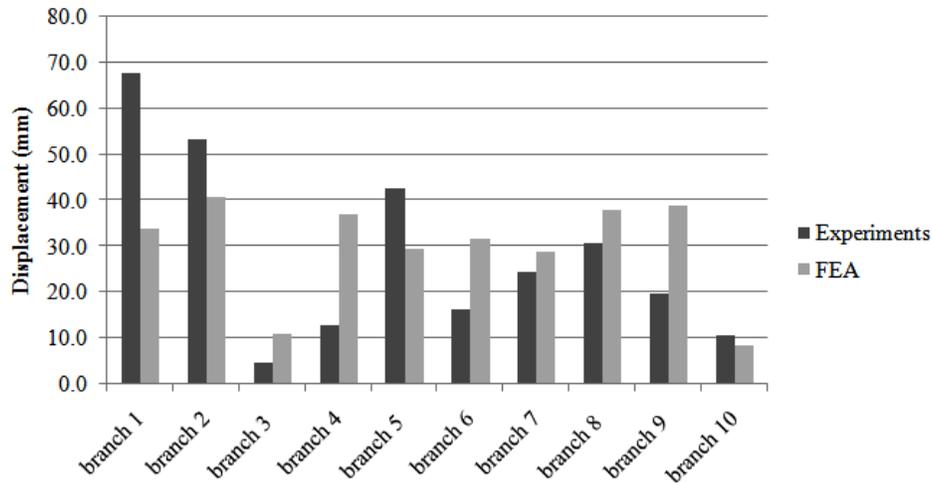


Figure 14. Experimental vs. simulated (FEA) results for the load of 1 N

## CONCLUSIONS

In this paper, the modeling of a coffee plant has been developed from a real plant. Separated parts of the coffee plant have been scanned and joined using free software. The modeling methodology to generate a coffee plant model from scanning process was satisfactory for the simulations, considering the difficulties to scan complex geometries and the joining process of scanned parts.

Simplifications on material mechanical properties (linear, homogeneous and isotropic material considered) can be considered a deficiency of this work. However, the coffee plant geometry obtained

from scanned parts and mechanical simplified properties from experimental tests were enough for displacements prediction analysis in specific branches. Simulations from coffee detachment loads of 0.5 and 1.0 N provided displacements in ten branches and they were compared to experimental results. It was observed minor difference for shorter branches while longest branches presented major differences in terms of displacements as result of large deflections.

Despite of the difference found in displacement results, a real coffee plant was totally scanned and a model is now ready for performing new simulations such as vibration. Since properties from one direction of the material is already known from the experiments, the recommendation for future works is to perform new experiments in order to obtain the elasticity modulus in other direction. Also for future works, the recommendation is to perform an iterative procedure to minimize the error in the displacements. The suggestion is to modify Young's modulus in the numerical model having into account that the current value is the starting point. Those actions will improve the model and new simulations can be performed for material adjustment until the displacement present

small numerical error respect to the experimental values helped by an iterative process.

Considering the methodology for modeling new plants and numerical analysis via FEA proposed in this paper, machine optimization processes can be conducted as result of the plant and machine model interaction such as coffee harvester machine best dimensions, vibrating blades best material and also appropriated frequencies and amplitudes of vibration for coffee harvesting. This can contribute for the development of new technologies and agricultural industries may be benefited from improvements in the mechanized harvesting process of coffee.

### **ACKNOWLEDGEMENTS**

The authors greatly acknowledge CNPQ and FAPEMIG (TEC-APQ-00535-14) for providing funding for this research.

## REFERENCES

ABNT, 1997. Projeto de estruturas de madeira. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7190, 107 p.

Bishop, N.W.M., 1999. Vibration fatigue analysis in the finite element environment. XVI encuentro del grupo español de fractura, Spain.

Bofang, Z., 2014. Finite Element Method for Computing Temperature Field. Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete, p.185-203.

Celik, H.K.; Rennie, A.E.W.; Akinci, I., 2011. Deformation behaviour simulation of an apple under drop case by finite element method. Journal of Food Engineering, vol.104, p. 293-298.

Chandrasekar, V.; Viswanathan, R., 1999. Physical and Thermal Properties of Cofee. Journal of Agricultural Engineering Research. vol.73, p.227-234.

Cilas, C.; Godin, C; Bertrand, B.; Montagnon, C; Baillères, H., 2010. Genetic Study on Several Mechanical Properties of the Wood of *Coffea arabica* and *Coffea canephora* Coffee Trees. International Conference on Coffee Science, Bali, Indonesia. ASIC, p.638-642.

Ciro, V. H. J., 2001. Coffee harvesting I: Determination of the natural frequencies of the fruit stem system in coffee trees. *Applied Engineering in Agriculture*, vol.17, n.4, p.475-479.

D'alfonso, T.H.; Kamath, S.; Puri, V.M., 1997. Agricultural and biological engineering applications of the boundary element method. *Applied engineering in agriculture*, vol. 13, n. 2, p. 273-281.

Knight, C.E., 2012. *The finite element method in mechanical design*. Boston: PWS-KENT, 1993. 326 p.

Lee, J.H.; Lee, B.S. ; Au, F.T.K.; Zhang J.; Zeng, Y., 2012. Vibrational and dynamic analysis of C60 and C30 fullerenes using FEM. *Computational Materials Science*, vol. 56, p. 131-140.

Li, Z.; Li, P.; Yang, H.; Liu, J., 2013. Internal mechanical damage prediction in tomato compression using multiscale finite element. *Journal of Food Engineering*, vol.116, n.3, p.639-647.

Magalhaes, A. C.; Teixeira, M. M.; Couto, S. M.; Resende, R. C., 2006. Modeling of pneumatic machine collector of coffee fruits on yard using finite elements analysis. *Agricultural Engineering Journal*. vol.26, n.2, p. 483-492.

Marija, R. J.; Natalija, R. D.; Biljana, R. C.; Slavica, G.; Božana, O., 2012. Changes of physical properties of coffee beans during Roasting. *Acta periodica technologica*, vol.43, p. 21-31.

Ng, S. F.; Cheung, M. S.; Xu, T., 1990. A combined boundary element and finite element solution of slab and slab-on-girder bridges. *Computers & Structures*, vol.37, n.6, p. 1069-1075.

Nguyen-Thoi, T.; Phung-Van, P.; Nguyen-Hoang, S.; Lieu-Xuan, Q., 2014. A smoothed coupled NS/nES-FEM for dynamic analysis of 2D fluid–solid interaction problems. *Original Applied Mathematics and Computation*, vol. 232, p. 324-346.

Nilnonta et al, 2012. Finite element simulation for coffee (*Coffea arabica*) drying. *Food Bioprod. Process.*, vol.90, p. 341-350.

Olukunle, O.J.; Akinnuli, B.O., 2012. Investigating Some Engineering Properties of Coffee Seeds and Beans. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, vol.3, n.5, p. 743-747.

Piotr, M.; Pieczywek, A. Z., 2014. Finite element modelling of the mechanical behaviour of onion epidermis with incorporation of nonlinear properties of cell wall sandreal tissue geometry. *Journal of Food Engineering*, vol. 123, p. 50-59.

Preuksakarn, C.; Boudon, F.; Ferraro, P.; Durand, J.P.; Nikin-maa, E., 2010. Reconstructing Plant Architecture from 3D Laser scanner data. 6th

International Workshop on Functional-Structural Plant Models, Sep 2010, Davis, United States. p.12-17.

Santos F. L., Queiroz, D. M.; Pinto, F.A.C.; Resende, R.C., 2010. Frequency and amplitude of vibration on coffee harvesting. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol.14, n.4, p. 426-431.

Santos F.L., Queiroz, D. M.; Valente, D.S.M; Coelho, A.L.F, 2015. Simulation of the dynamic behavior of the coffee fruit-stem system using finite element method. Acta Scientiarum. Technology Maringá, vol. 37, n. 1, p. 11-17.

Savary, S.K.J.U.; Ehsani, R.; Schueller, J.K. Rajaraman BP., 2010. Simulation study of citrus tree canopy motion during harvesting using a canopy shaker. American Society of Agricultural and Biological Engineers, vol.53, p.1373-1381.

Silva, E.P.; Silva, F.M.; Magalhaes, R.R., 2014. Application of Finite Elements Method for Structural Analysis in a Coffee Harvester. *Engineering*, vol.6, n.3, p.138-147.

Silva, F.C.; Silva, F.M.; Alves, M.C.; Barros, M.M.; Sales, R.S., 2010. Behavior of the coffee fruit detachment force throughout the harvest period. *Science and Agrotechnology*, vol. 34, n. 2, p.468-474.

Tagar, A.A.; Changying, J.; Adamowski, J.; Malard, J.; Qi, C.S.; Qishuo, D.; Abbasi, N.A., 2015. Finite Element Simulation of Soil Failure Patterns under Soil Bin and Field Testing Conditions. *Soil & Tillage Research*, vol. 145, p.157-170.

Takeshi, O.; Toru, O.; Reiji, T.; Noriko, O., 2014. A finite-element method using dispersion reduced spline elements for room acoustics simulation. *Applied Acoustics*, vol.79, p.1-8.

Tinoco, H.A.; Ocampo, D.A., Peña, F.M.; Sanz-Urbe, J.R., 2014. 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, vol. 108, p.17-27.

Turner, M.J.; Clough, R.H.; Martin, H.C.; Topp L.J., 1956. Stiffness and deflection analysis of complex structures. Journal of the Aeronautical Sciences, vol. 23, p.805-823.

Zhan, Z.; Yafang, W.; Jianjun, Y.; Zhong, T., 2015. Monitoring method of rice seeds mass in vibrating tray for vacuum-panel precision seeder. Computers and Electronics in Agriculture, vol. 114, p. 25-31.