



---

**TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO**

**DESENVOLVIMENTO DE TUBETES PARA O PLANTIO DE CAFÉ VIA  
MANUFATURA ADITIVA COM POLÍMERO BIODEGRADÁVEL**

Nicolle Goi Pereira

264978

Orientadora: Ruth Marlene Campomanes Santana

Porto Alegre

2024

## AGRADECIMENTOS

Sempre acreditei que sonho que se sonha junto vira realidade, então destino este espaço para agradecer aqueles que se fizeram presentes durante todo o processo de idealização e construção desse trabalho, assim como na jornada acadêmica da graduação.

Primeiramente agradeço a minha mãe, Marcy, que foi meu alicerce desde o dia em que li meu nome no listão e estendo o agradecimento à minha irmã, Rafaella, que é a minha inspiração na busca da realização dos sonhos. Agradeço também à minha família, composta majoritariamente de mulheres, que sempre me ensinaram a lutar para conquistar meu espaço no mundo, e ao meu parceiro, Alyson, pelo companheirismo e cuidado.

Agradeço à profa. Dra. Ruth Campomanes Santana, não só pela orientação no trabalho, mas também por transmitir seus conhecimentos com muita dedicação e carinho por seus alunos.

Agradeço ao departamento da Engenharia de Materiais pela infraestrutura fornecida para a realização do trabalho e por todos os anos de ensinamentos teóricos e práticos.

Agradeço ao Engenheiro de Materiais Dillan Passos Bernardes, pela liderança durante o período do meu estágio, me apresentando e capacitando no mundo da manufatura aditiva, sempre incentivando que eu tivesse autonomia para conduzir esse projeto.

Agradeço às amigas que fui agregando a cada ciclo da minha vida. Às amigas que estão comigo desde o ensino médio, aos amigos que os esportes me apresentaram, às minhas colegas de estágio que foram essenciais no processo de desenvolvimento desse trabalho tanto prático quanto emocional e aos amigos que a graduação me apresentou desde a primeira aula de cálculo e aos que surgiram ao longo dos anos na engenharia, especialmente aos que fizeram parte do CEEMA ao meu lado.

Agradeço à Associação Atlética da Escola de Engenharia, instituição em que vivi e dediquei os melhores anos da graduação, que me trouxe vivências inimagináveis, emoções inexplicáveis e amigas que levarei para a vida.

Por fim, agradeço à UFRGS por abrir as portas de um ensino de qualidade com excelência em pesquisa, por todas as oportunidades valiosas dentro e fora da sala de aula e por me capacitar para as próximas etapas que virão.

## RESUMO

A cafeicultura tem destaque no agronegócio brasileiro e grande importância no cenário econômico nacional. Para o plantio de mudas de café é necessário alto nível de qualidade, pois a fase de implantação pode gerar efeitos prejudiciais no desenvolvimento. A embalagem tem papel fundamental para a proteção das raízes contra danos e orientação do crescimento de maneira saudável; as mais utilizadas atualmente são as sacolas e os tubetes de polietileno, contudo fabricados a partir de fontes não renováveis e seu descarte inadequado somado à curta vida útil representam problemas ambientais. As sacolas, por serem um ambiente fechado, propiciam o enovelamento das raízes das mudas, enquanto os tubetes, embora possuam ranhuras para direcionar o crescimento das raízes, apresentam volume de substrato limitado. Diante desse contexto, a pesquisa objetivou desenvolver novos modelos de tubetes com capacidade volumétrica intermediária, características favoráveis para o crescimento das raízes e a partir de uma blenda biodegradável de PBAT e amido termoplástico, possibilitando a implantação da muda sem sua remoção. Os protótipos foram desenvolvidos via manufatura aditiva com uma impressora de extrusão direta por *pellets* e apresentaram flexibilidade aparente. As dimensões projetadas (50 mm de raio, 120 mm de altura e 2 mm de espessura) alcançaram uma capacidade volumétrica de 235,5 ml. O material foi caracterizado quanto a sua hidrofobicidade, ecotoxicidade, absorção de umidade e de água; os tubetes foram avaliados quanto à sua degradação pelo ensaio de compostagem e suas características foram testadas através do teste de crescimento das raízes, que foram comparadas baseadas em variáveis morfológicas indicadoras da qualidade das mudas. Os resultados obtidos indicaram uma absorção de umidade e de água em quarenta e oito (48) horas de 5% e 26%, respectivamente, enquanto o polietileno teve aumento de massa médio de 2% para ambos os ensaios. Não houve indícios da liberação de substâncias tóxicas na degradação do material pelo teste de ecotoxicidade pois não teve alteração no pH da água durante o tempo de ensaio. No ensaio de biodegradação por compostagem, em sessenta (60) dias os tubetes apresentaram perda de 56% em massa, indicando resultados promissores alinhados ao tempo de germinação do café. Todas as sementes germinaram e tiveram bom desenvolvimento radicular nas características testadas. O modelo ideal, determinado com base na germinação, indicou um tubete com vincos internos, base desenhada com múltiplas aberturas e orifícios na parte inferior das paredes apenas, podendo ter formato tanto cilíndrico quanto paralelepípedo. Os resultados mostraram que os tubetes feitos com o material polimérico biodegradável são promissores para a aplicação.

**Palavras-chave:** Tubetes, Manufatura aditiva, Biodegradável, Germinação de café

## ABSTRACT

The coffee industry holds a significant position in Brazilian agribusiness, playing a vital role in the country's economy. Ensuring high-quality planting of coffee seedlings is crucial, as the initial phase can impact their development adversely. Commonly used polyethylene bags and tubes, while effective, are derived from non-renewable sources, posing environmental challenges due to improper disposal and a short lifespan. Bags tend to cause root entanglement, while tubes, despite having grooves for root guidance, offer limited substrate volume. This study aims to introduce new tube models with intermediate volumetric capacity, promoting healthy root growth, and incorporating a biodegradable composite of PBAT and thermoplastic starch. Prototypes, developed through additive manufacturing, displayed apparent flexibility with dimensions (50 mm radius, 120 mm height and 2 mm thickness) achieving a volumetric capacity of 235,5 ml. Material properties such as hydrophilicity, ecotoxicity, moisture absorption, and water absorption were evaluated. The tubes underwent composting tests, and their characteristics were assessed through root growth tests, comparing morphological variables indicating seedling quality. Results revealed a moisture and water absorption of 5% and 26% in 48 hours, respectively, compared to a 2% increase in polyethylene. Ecotoxicity testing showed no indication of toxic substance release during material degradation. In composting tests, tubes exhibited a 56% mass loss in 60 days, aligning with coffee germination timelines. All seeds germinated with robust root development and the ideal model, determined by germination, featured tubes with internal folds, a base with multiple openings, and bottom-wall openings, allowing both cylindrical and parallelepipedic shapes. These findings highlight the promise of biodegradable polymer tubes for coffee seedling applications.

**Key words:** Tube models, Additive Manufacturing, Biodegradable, Coffee Germination

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Parafuso de uma impressora de <i>pellets</i> .....	16
<b>Figura 2:</b> Germinação epígea e hipógea .....	18
<b>Figura 3:</b> Estágios de germinação do Feijão - Dicotiledônea.....	19
<b>Figura 4:</b> Sistema radicular de raiz pivotante. ....	19
<b>Figura 5:</b> Estrutura molecular do PBAT .....	21
<b>Figura 6:</b> Processo de plastificação do amido termoplástico .....	23
<b>Figura 7:</b> Fluxograma representando as etapas práticas do procedimento experimental.....	24
<b>Figura 8:</b> (a) Impressora de <i>pellets</i> utilizada para a impressão dos modelos (G5 Piocreat); (b) Sistema de alimentação e de extrusão; (c) Bico extrusor. ....	27
<b>Figura 9:</b> medidas relacionadas do tubete cilíndrico. ....	28
<b>Figura 10:</b> Medidas relacionadas do tubete paralelepípedo. ....	28
<b>Figura 11:</b> Interface do Software SurfTens 3.0 (OEG GmbH).....	29
<b>Figura 12:</b> Amostras no ensaio de compostagem .....	30
<b>Figura 13:</b> Teste de ecotoxicidade: (a) cebolas em contato com a água nos tubos Falcon; (b) amostra apenas com água; (c) amostra com o material biodegradável. ....	31
<b>Figura 14:</b> Ensaio de absorção de umidade: (a) câmara de umidade relativa 75%, (b) amostras apoiadas no tule para ficarem imersas na câmara.....	32
<b>Figura 15:</b> Ensaio de absorção de água: (a) Amostras na incubadora; (b) Erlenmeyer com amostra do filme biodegradável; (c) Erlenmeyer com filme de polietileno.....	33
<b>Figura 16:</b> Tubete e Sacolas de Polietileno .....	35
<b>Figura 17:</b> Desenhos dos tubetes em 3 dimensões utilizados para o ensaio de degradação .....	36
<b>Figura 18:</b> Desenho dos tubetes em 3 dimensões utilizados para a avaliação do crescimento das raízes.....	36
<b>Figura 19:</b> Camada de borda da impressão 3D.....	37
<b>Figura 20:</b> Modelos de tubetes impressos via manufatura aditiva com material biodegradável...	38
<b>Figura 21:</b> Demonstração da flexibilidade aparente dos tubetes impressos.....	38
<b>Figura 22:</b> Comparação da capacidade volumétrica dos tubetes desenvolvidos com os produtos comerciais de polietileno .....	39
<b>Figura 23:</b> Aspecto dos tubetes antes e após o tempo de compostagem do ensaio .....	40
<b>Figura 24:</b> Gráfico de percentual de massa restante (%) por tempo de ensaio (dias) .....	41
<b>Figura 25:</b> Extrapolação logarítmica do tempo de exposição para degradação de cada modelo de tubete .....	42

<b>Figura 26:</b> Cebolas após uma semana de ensaio .....	43
<b>Figura 27:</b> Medição de pH das amostras após o término do ensaio. ....	44
<b>Figura 28:</b> Crescimento das raízes das cebolas após 7 dias de ensaio .....	44
<b>Figura 29:</b> crescimento das raízes das cebolas após 14 dias de ensaio .....	44
<b>Figura 30:</b> Comprimento médio das raízes das cebolas no ensaio de ecotoxicidade das amostras contendo o material biodegradável (Tubete) e apenas com água (Branco). ....	45
<b>Figura 31:</b> Quantidade média de raízes nas cebolas do ensaio de ecotoxicidade das amostras contendo o material biodegradável (Tubete) e apenas com água (Branco). ....	45
<b>Figura 32:</b> Imagem capturada da gota pingada sobre o filme do material biodegradável. ....	46
<b>Figura 33:</b> Montagem do ensaio de ângulo de contato. ....	46
<b>Figura 34:</b> Ângulo de contato do material biodegradável e do polietileno .....	47
<b>Figura 35:</b> Absorção de umidade em função do tempo para o material biodegradável e para o polietileno .....	48
<b>Figura 36:</b> Aumento de massa no ensaio de absorção de água (%) em função do tempo de exposição (dias) .....	48
<b>Figura 37:</b> Modelos I e II .....	49
<b>Figura 38:</b> Desenvolvimento da parte aérea dos modelos I e II .....	50
<b>Figura 39:</b> Sistema radicular dos modelos I e II .....	50
<b>Figura 40:</b> Comparação da altura da parte aérea (a), do diâmetro do colo (b) e a relação H/D (c) dos modelos I e II que comparam a existência dos vincos internos. ....	51
<b>Figura 41:</b> Comparação da massa (a) e da altura do sistema radicular (b) dos modelos I e II que comparam a existência dos vincos internos. ....	52
<b>Figura 42:</b> Modelos II e III .....	53
<b>Figura 43:</b> Desenvolvimento da parte aérea dos modelos II e III .....	53
<b>Figura 44:</b> Sistema radicular dos modelos II e III .....	53
<b>Figura 45:</b> Comparação da altura da parte aérea (a), do diâmetro do colo (b) e a relação H/D (c) dos modelos II e III, que comparam o desenho da base do tubete. ....	54
<b>Figura 46:</b> Comparação da massa (a) e da altura do sistema radicular (b) dos modelos II e III, que comparam o desenho da base do tubete. ....	55
<b>Figura 47:</b> Modelos III, IV e V .....	56
<b>Figura 48:</b> Desenvolvimento da parte aérea dos modelos III, IV e V .....	56
<b>Figura 49:</b> Sistema radicular dos modelos III, IV e V .....	56

<b>Figura 50:</b> Comparação da altura da parte aérea (a), do diâmetro do colo (b) e a relação H/D (c) dos modelos III, IV e V, que comparam a influência das aberturas nas paredes.....	57
<b>Figura 51:</b> Comparação da massa (a) e da altura do sistema radicular (b) dos modelos III, IV e V, que comparam a influência das aberturas nas paredes. ....	58
<b>Figura 52:</b> Modelos IV e VI .....	59
<b>Figura 53:</b> Desenvolvimento da parte aérea dos modelos IV e VI.....	59
<b>Figura 54:</b> Sistema radicular dos modelos IV e VI .....	59
<b>Figura 55:</b> Comparação da altura da parte aérea (a), do diâmetro do colo (b) e a relação H/D (c) dos modelos IV e VI, que comparam os formatos dos tubetes.....	60
<b>Figura 56:</b> Comparação da massa (a) e da altura do sistema radicular (b) dos modelos IV e VI, que comparam os formatos dos tubetes.....	61
<b>Figura 57:</b> Comparação de todas as variáveis morfológicas para todos os modelos de tubetes ...	62

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Nomenclatura e relação dos modelos de tubetes desenhados .....	25
<b>Tabela 2:</b> Parâmetros utilizados para impressão 3D do material biodegradável .....	26
<b>Tabela 3:</b> Medidas do tubete cilíndrico .....	28
<b>Tabela 4:</b> Medidas do tubete paralelepípedo .....	28
<b>Tabela 5:</b> Nomenclatura e relação dos modelos de tubetes utilizados na avaliação do crescimento das raízes.....	33
<b>Tabela 6:</b> Tempo de exposição calculado para ocorrer a amostra em 50%, 25% e 10%.....	42
<b>Tabela 7:</b> Modelos considerados ideais para a plantação das mudas de café .....	62



## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS**

FDM – *Fused Deposition Modeling* (Modelagem de deposição fusionada)

FFF – *Fused Filament Fabrication* (Fabricação com filamento fundido)

PBAT – Poli (butileno adipato co-tereftalato)

PBT – Poli (Tereftalato de butileno)

PCL - Policaprolactona

PET – Poli (Tereftalato de etileno)

PHB – Poli (hidroxibutirato)

PLA – Poli (ácido láctico)

PTA - Ácido Tereftálico Purificado

SLA – Stereolithography (Estereolitografia)

TPS – *Thermoplastic Plasticized Startch* (Amido Termoplástico)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivos Gerais .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Manufatura Aditiva .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2</b>	<b>Desenvolvimento de mudas de café .....</b>	<b>16</b>
<b>3.3</b>	<b>Germinação de sementes .....</b>	<b>17</b>
<b>3.4</b>	<b>Crescimento das raízes .....</b>	<b>18</b>
<b>3.5</b>	<b>Polímeros Biodegradáveis .....</b>	<b>20</b>
<b>3.5.1</b>	<b>PBAT .....</b>	<b>20</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Amido Termoplástico .....</b>	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>24</b>
<b>4.1</b>	<b>Impressão 3D .....</b>	<b>24</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Desenho dos modelos .....</b>	<b>24</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Prototipagem via Manufatura Aditiva .....</b>	<b>26</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Capacidade volumétrica .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2</b>	<b>Ensaio .....</b>	<b>28</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Ângulo de contato .....</b>	<b>28</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Biodegradação via compostagem .....</b>	<b>29</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Teste de ecotoxicidade .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Absorção de umidade .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Absorção de água .....</b>	<b>32</b>
<b>4.3</b>	<b>Crescimento das raízes .....</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>35</b>
<b>5.1</b>	<b>Impressão 3D .....</b>	<b>35</b>

<b>5.1.1</b>	<b>Desenho dos modelos</b> .....	<b>35</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Prototipagem via Manufatura Aditiva</b> .....	<b>37</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Capacidade volumétrica</b> .....	<b>39</b>
<b>5.2</b>	<b>Propriedades</b> .....	<b>39</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Biodegradação via Compostagem</b> .....	<b>39</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Ecotoxicidade</b> .....	<b>43</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Ângulo de contato</b> .....	<b>46</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Absorção de Umidade</b> .....	<b>47</b>
<b>5.2.5</b>	<b>Absorção de água</b> .....	<b>48</b>
<b>5.3</b>	<b>Crescimento de raízes</b> .....	<b>49</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Influência de vincos internos</b> .....	<b>49</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Desenho da base do tubete</b> .....	<b>52</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Presença de aberturas nas paredes</b> .....	<b>55</b>
<b>5.3.4</b>	<b>Diferença de formato</b> .....	<b>58</b>
<b>5.3.5</b>	<b>Definição do modelo ideal</b> .....	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>63</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D, é uma tecnologia baseada na deposição de camada sobre camada com finalidade de materializar desenhos realizados digitalmente por *softwares* (CAD-*Computer Aided Design*); devido à sua liberdade de criação e de correção, é muito utilizada como ferramenta de prototipagem para a confecção de novos produtos, embalagens e até mesmo peças de reposição para as mais variadas aplicações. Existem diversos tipos de impressão 3D cujo uso depende da aplicação a que se destina, dentre eles os mais populares são a estereolitografia (SLA) e deposição por filamento fundido (FDM/FFF), sendo o segundo o mais efetivo para a impressão de protótipos e peças customizadas termoplásticas (Shaik, 2012). Outra tecnologia que vem crescendo é a manufatura aditiva com extrusão por *pellets*, a qual segue um princípio similar à de filamento fundido, porém utilizando diretamente os *pellets* ao invés de filamento; tal sistema permite a utilização de materiais diferentes, incluindo os polímeros com características mais flexíveis e que são mais desafiadores para produção de filamentos.

Unindo a liberdade de criação da manufatura aditiva com a possibilidade de utilização de materiais inovadores nas impressoras de *pellets*, o presente trabalho tem como escopo o desenvolvimento de novos modelos de tubetes para plantação de mudas de café, que possuem um sistema radicular de raiz pivotante, em que a primeira raiz é chamada de primária e dá origem a ramificações laterais (RAVEN, EVERT, & EICHCHORN, 2001). A cafeicultura tem grande importância econômica, sendo um grande destaque no agronegócio brasileiro, movimentando cerca de US\$ 4,5 bilhões e gerando mais de 8,5 milhões de empregos diretos e indiretos, de acordo com o CECAFÉ (Conselho dos Exportadores de Café do Brasil).

O plantio de mudas exige alto nível de qualidade, sendo essa fase de extrema importância no resultado da plantação. A forma e tamanho do recipiente em que são plantadas influenciam diretamente no crescimento das raízes assim como na dinâmica de movimentação de água; os mais usados são as sacolas de polietileno pois permitem um grande volume de substrato (Vallone, 2010). A embalagem tem papel fundamental para proteger as raízes contra danos mecânicos, desidratação e orientar o crescimento da maneira mais saudável, maximizando a taxa de sobrevivência das mudas e seu desenvolvimento pós plantio. Atualmente os tubetes comercializados não tem capacidade volumétrica no nível dos sacos de polietileno, por isso seu

uso ainda é inferior e de menor preferência dos consumidores, embora possuam a vantagem da facilidade de manejo nos viveiros, no transporte e no plantio. Já as sacolas de polietileno, por serem um ambiente fechado de crescimento para as raízes, não impedem o enovelamento delas, tendo como consequência a remoção da parte inferior da muda para se realizar o plantio. Os tubetes possuem ranhuras em suas paredes que direcionam o crescimento das raízes para evitar o enovelamento, contudo a sua baixa capacidade volumétrica leva à formação de nós na raiz principal, podendo às vezes impedir o transporte de água e nutrientes para a planta. Ambos os recipientes são produzidos por polímeros de fontes não renováveis, tornando-se um problema pós consumo pelo descarte inapropriado e sua curta vida útil.

A utilização de polímeros biodegradáveis, definidos pela ASTM D-833 como os materiais em que a ação de microrganismos resulta na sua degradação, tais como fungos, bactérias e algas de ocorrência natural vem crescendo cada vez mais no campo de produção de embalagens para as diversas aplicações do mercado. A fabricação desses polímeros pode ser feita a partir de variadas fontes naturais e renováveis, permitindo, assim, uma redução significativa do uso de polímeros à base de combustíveis fósseis e na emissão de gases prejudiciais ao meio ambiente.

O amido é uma das fontes mais abundantes de carboidratos e, quando submetido à pressão, cisalhamentos e temperaturas na faixa de 90-180°C com plastificantes como água ou glicerol, se transforma em um material fundido. Nesse fundido, as cadeias de amilose e amilopectina estão intercaladas e a estrutura original semicristalina é destruída; esse material é denominado amido termoplástico (TPS) (Avérous, 2004). O TPS é uma das mais promissoras fontes de polímeros renováveis devido à sua disponibilidade, fácil produção, rentabilidade e manuseio simplificado. Pode ser obtido dos mais diversos cereais e tubérculos e um dos mais utilizados é o amido de batata. A adição de plastificantes reduz as forças intermoleculares e aumenta a mobilidade das cadeias poliméricas, diminuindo a temperatura de transição vítrea e aumentando a permeabilidade (Martinez Villadiego, 2022).

A realização deste trabalho consiste na utilização de um material polimérico biodegradável em formato de *pellets*, a ser usado para a prototipagem de novos modelos de tubetes que unem as características mais favoráveis de capacidade volumétrica dos sacos de polietileno com a praticidade de transporte e de direcionamento do crescimento das raízes dos tubetes de polietileno. Os novos modelos têm como aplicação a plantação de mudas com sistema radicular de raiz pivotante e são feitos a partir da manufatura aditiva em uma impressora com tecnologia de extrusão direta por *pellets*.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos Gerais**

Desenvolver modelos de tubetes para plantação de mudas do setor cafeeiro utilizando a manufatura aditiva como ferramenta de prototipagem com um material polimérico biodegradável.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Desenhar e imprimir os modelos com diferentes *designs* utilizando um *software* de modelagem e uma impressora de *pellets* do modelo G5 da marca *Piocreat*;
- Determinar os parâmetros de processamento do material polimérico biodegradável na manufatura aditiva;
- Estudar a influência das diferentes características dos modelos de tubetes perante a degradação e crescimento das raízes das mudas;
- Caracterizar o material polimérico biodegradável quanto à sua toxicidade, ângulo de contato, absorção de umidade e solubilidade em água.

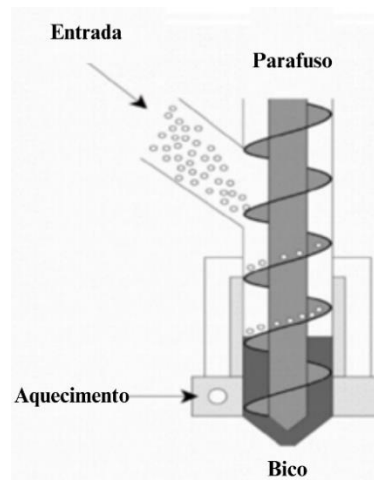
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, é o método de materialização de um objeto a partir da sobreposição de camadas pré-definidas em um software de fatiamento de desenhos em três dimensões. Pela definição adaptada do comitê ASTM F42 “É definido como o processo de adicionar materiais para criar objetos a partir de um modelo 3D, normalmente camada a camada, diferente das tecnologias de manufatura subtrativa”. Embora já existam tecnologias de manufatura aditiva com materiais metálicos, os poliméricos ainda dominam esse campo. A técnica é uma ótima alternativa para a prototipagem de novos modelos ou de peças de reposição, pois a liberdade de design permite pequenas mudanças que não teriam viabilidade econômica para, por exemplo, serem produzidos moldes diferentes para cada alteração. A impressão 3D por filamento fundido utiliza os polímeros em formato de fio que passam em um extrusor aquecido, fundindo e depositando as camadas poliméricas na mesa conforme o código gerado no *software* de fatiamento.

Uma alternativa para reduzir o custo da manufatura aditiva é a impressão direta por *pellets*, eliminando a necessidade de fabricação de filamentos e baixando o custo por quilograma de material, possibilitando a utilização de maior variedade de materiais, principalmente dos mais flexíveis, que têm maior dificuldade para serem impressos devido ao cisalhamento das engrenagens que transportam o filamento até o bico, além de viabilizar a impressão de peças maiores em um tempo menor por serem utilizados bicos de maior diâmetro que permitem aumentar a vazão de material, promove uma reciclabilidade de materiais previamente impressos ou de polímeros reciclados que podem ser alimentados no extrusor. (Shaik, 2021). A impressão por extrusão direta de *pellets* permite a redução de uma etapa da cadeia produtiva que é a produção do filamento para o processo de manufatura aditiva por deposição de filamento fundido.

**Figura 1:** Parafuso de uma impressora de *pellets*



Fonte: Adaptado de (Shaik, 2021)

O funcionamento de uma impressora direta por *pellets* tem o mesmo princípio do filamento fundido, porém com algumas peças diferentes como uma rosca que transporta o material até o extrusor; essa rosca possui uma região de transporte, de fundição e de mistura, que é responsável por transformar o material do seu estado original sólido, para um estado fundido que irá cristalizar ao ser resfriado e será depositado camada sobre camada para formar o objeto previamente programado.

### **3.2 Desenvolvimento de mudas de café**

O Brasil é responsável por grande parte da produção de café do mundo, tendo esse mercado um grande impacto na economia do país. O planejamento de todas as fases do cultivo cafeeiro é imprescindível para uma plantação de qualidade; os erros cometidos nesse período podem ser cruciais e comprometer a colheita, levando a uma baixa produtividade e redução na longevidade da lavoura (Vallone, 2010). Por ser uma cultura perene, isto é, uma cultura que possui um ciclo de vida longo e o principal produto são os frutos, não há necessidade de replantar após a colheita, de modo que o maior investimento se dá na sua implantação. Para garantir uma produção de mudas de qualidade, as primeiras características a se levar em consideração são o tipo de substrato e o tamanho do recipiente.

O tipo de substrato interfere na arquitetura do sistema radicular e na nutrição das mudas, tendo efeito direto na qualidade final das plantas. Devem ser consideradas algumas



características como densidade, porosidade, capacidade do campo, pragas e possíveis patógenos, além da viabilidade econômica para cada muda (Pereira, 2010). A capacidade volumétrica dos recipientes é uma característica que também interfere na qualidade das mudas; segundo a literatura, as mudas de espécies perenes cultivadas em recipientes de maior dimensão resultam em mudas de maior qualidade. Por armazenarem um volume maior de substrato e assim as raízes possuírem uma área maior de exploração, o cultivo nos sacos de polietileno geralmente apresenta melhor crescimento de muda, entretanto os tubetes apresentam algumas vantagens como redução do período no viveiro, antecipação o plantio no campo e redução do uso de substrato, evitando plantas daninhas e eliminando problemas de “pião torto” e de enovelamento das raízes. (Tubaldini, 1997)

O problema de “pião torto” é recorrente no sistema radicular de cafeeiros. A abertura na parte inferior dos tubetes de polietileno comerciais faz com que o crescimento dessas raízes tenha um direcionamento e, ao atingir a extremidade, que aconteça uma poda natural das raízes secundárias, diferente do que ocorre com o uso das sacolas de polietileno que, por possuírem o fundo fechado, quando a raiz o atinge acaba se enovelando por não ter mais espaço para crescer. (De Oliveira, 2013).

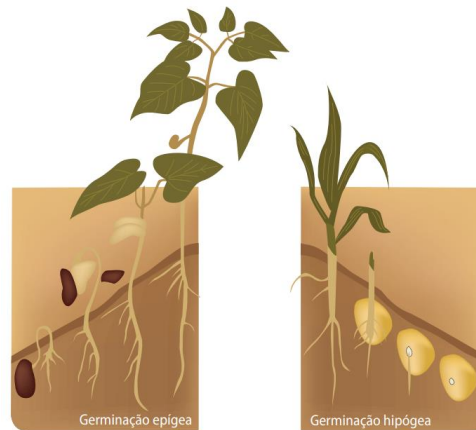
A utilização dos tubetes de polietileno vem crescendo significativamente no plantio de café pois diminuem o tempo de residência da muda, atenuam as chances de contaminação por agentes patógenos, aumentam o crescimento da raiz principal aplacando a chance de dobramento da mesma, necessitam de menor volume de substrato, gerando economia de matéria prima e redução do crescimento de ervas daninhas, do espaço necessário antes do plantio e dos custos de transporte graças a sua maior praticidade (Tomaz M. A. et al, 2015).

### **3.3 Germinação de sementes**

O processo de germinação de sementes depende da ocorrência de uma sequência ordenada de acontecimentos envolvendo divisões celulares, acúmulo de reservas e perda de água. A germinação é caracterizada pelo fim de um processo de suspensão temporária do crescimento, que é um período associado às condições ambientais e à espécie, permitindo que a semente germine apenas em condições adequadas (Ferreira, et al., 2004). Para que o embrião volte a crescer, a semente deve se submeter a fatores externos como água, oxigênio e temperatura em níveis elevados; quando se inicia a germinação, geralmente a raiz é a primeira a emergir e de acordo com o crescimento caulinar pode ser chamada de epígea ou hipógea, dependendo do crescimento dos cotilédones, que são as primeiras folhas da planta, chamadas de hipocótilos,

que guardam seus nutrientes até que as folhas definitivas cresçam e tenham a capacidade de fazer a fotossíntese. Quando o crescimento do cotilédone ocorre acima do solo é chamada de germinação epígea, que é o caso das sementes de café, feijão, cebola, alface, pepino, algodão e abóbora. Já a germinação hipógea ocorre quando o cotilédone permanece abaixo do nível do solo, pode ser observada no desenvolvimento das ervilhas (Silveira Paulilo, et al., 2015).

**Figura 2:** Germinação epígea e hipógea

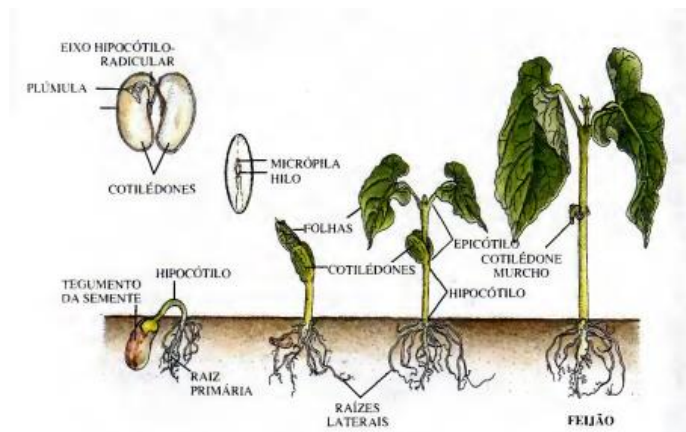


(Fonte: Fisiologia Vegetal, 2015 Universidade Federal de Santa Catarina. Biologia/EaD/UFSC)

### 3.4 Crescimento das raízes

As principais funções das raízes são a sustentação e fixação da planta no solo, absorção de água e sais minerais que são levados através do xilema para a parte aérea, além de atuarem como órgãos de reserva de nutrientes; algumas espécies, inclusive, são adaptadas especialmente para tal função. A primeira raiz a se formar, que se origina do embrião, é chamada de raiz primária e para as dicotiledôneas se torna a raiz pivotante. É o caso do café, feijão, amendoim, soja pois suas sementes apresentam dois cotilédones para o armazenamento de nutrientes.

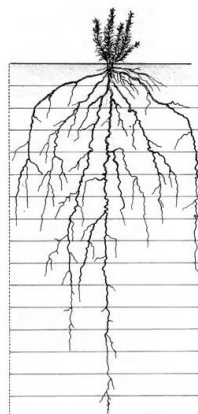
**Figura 3:** Estágios de germinação do Feijão - Dicotiledônea



(Fonte: Biologia Vegetal, 2001, Guanabara Koogan)

A raiz pivotante tem o crescimento direcionado para baixo e dá origem às ramificações, que podem ser chamadas de raízes laterais que crescem ao longo de seu comprimento. As monocotiledôneas apresentam um sistema radicular fasciculado, porém em geral as pivotantes apresentam maior penetração no solo. A extensão de crescimento tanto em profundidade de penetração no solo quanto em distância lateral que as raízes ramificadas ocupam depende de fatores como a umidade, temperatura e composição do solo. As raízes que acumulam maior fonte de nutrientes e que estão envolvidas ativamente no transporte destes ficam localizadas mais próximas da interface do solo, na grande maioria das espécies nos primeiros 15 centímetros. Durante o período de crescimento no solo, as raízes buscam o caminho que oferece menor resistência, podendo inclusive ocupar os espaços deixados por outras que se decompuseram com o tempo. (Raven, et al., 2001)

**Figura 4:** Sistema radicular de raiz pivotante.



(Fonte: Biologia Vegetal, 2001, Guanabara Koogan)

O ápice é coberto por uma massa de células que protege o meristema apical e ajuda a penetrar no solo, essa massa é chamada de coifa e, à medida que a raiz cresce em extensão, ela é empurrada para frente e as suas células vão sendo descamadas e ao mesmo tempo novas vão surgindo pela ação do sistema apical. A bainha mucilaginosa, que é composta por um polissacarídeo altamente hidratado, é secretada pelas células mais externas da coifa, que são liberadas enquanto são descamadas; ela é responsável por lubrificar a raiz e a coifa durante a passagem no solo e por controlar a resposta da raiz à gravidade. (Raven, et al., 2001)

Quando as raízes atingem o fundo do recipiente no qual a muda foi plantada, pode ocorrer o enovelamento delas, má formação ou a criação de nós na sua extensão, que reduzem o fornecimento de água e transporte de nutrientes. No caso dos sacos de polietileno, por ser um recipiente completamente fechado, as raízes crescem em direção ao fundo e se enovelam, sendo necessário remover a parte enovelada para plantar a muda posteriormente. Já os tubetes possuem ranhuras internas que previnem a formação das curvas e o enovelamento no fundo, porém podem apresentar a formação de nós pela limitação de espaço interno.

### **3.5 Polímeros Biodegradáveis**

Conforme estabelecido na norma ASTM-D-833, os polímeros biodegradáveis são os materiais em que a ação de microrganismos resulta na sua degradação, tais como fungos, bactérias e algas de ocorrência natural. A reação gera CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, componentes celulares e outros produtos. Pode se definir também como os materiais que se degradam pela ação de organismos vivos ou enzimas gerando dióxido de carbono, água e biomassa. (D.S Rosa, 2004). Existem muitas fontes de polímeros biodegradáveis, os de origem natural estão disponíveis em larga escala de fontes renováveis; enquanto os polímeros sintéticos são produzidos a partir de fontes não renováveis oriundas de petróleo. (Vroman, et al., 2009). Entre os polímeros biodegradáveis conhecidos e comercializados destacam-se o Poli (ácido láctico) (PLA), Policaprolactona (PCL), Poli (butileno adipato co-tereftalato) (PBAT), Poli (hidroxibutirato) (PHB) e Amido termoplástico (TPS). No presente trabalho serão usados os polímeros PBAT e TPS.

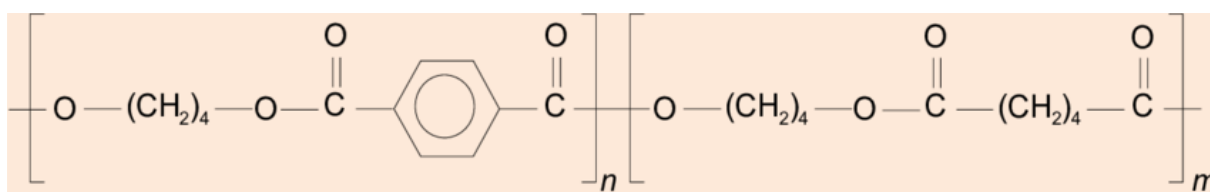
#### **3.5.1 PBAT**

Com o avanço das pesquisas referentes aos polímeros mais utilizados como poli (tereftalato de etileno) (PET) e poli (tereftalato de butileno) (PBT), vem-se observando que estes demonstram ser resistentes à hidrólise, a condições amenas do ambiente e a ataques de microrganismos diretamente. Segundo Jiao Jian et al (2020), as pesquisas demonstraram que uma

diminuição significativa da massa residual em comparação com a massa inicial de polímeros contendo Ácido Tereftálico Purificado (PTA) com cerca de 50% em mol em ensaios de compostagem simulada, indicando a decomposição biológica e uma hidrólise química ocorrem dentro de co-poliésteres. O teor de PTA em mols no copolímero tem influência sobre a taxa de degradação, de maneira a diminuir continuamente quando esse teor é aumentado, entretanto a taxa de 50% é adequada para a degradação em um processo de compostagem (U. Witt, 2001). O PBAT, poli(butileno adipato co-tereftalato), surgiu por volta dos anos 1990 a partir de pesquisas voltadas para o desenvolvimento de biopolímeros substituindo componentes do PBT, poli(tereftalato de butileno), separando as cadeias aromáticas desse polímero. O PBAT surgiu como uma ponte entre os poliésteres alifáticos e aromáticos, tornando-se assim, um polímero biodegradável.

O co-poliéster aromático poli(butileno adipato co-tereftalato) (PBAT) é proveniente de fonte fóssil e reconhecido por sua característica biodegradável, sendo um polímero de interesse industrial pois possui boas propriedades mecânicas quando comparado a outros polímeros. Uma de suas principais aplicações é em filmes para sopro, visto que possui flexibilidade similar ao Polietileno de baixa densidade, apresentando um índice de fluidez a 190°C de 4 g/10 min (Jiao Jian, 2020). É um material bastante promissor que tem grande potencial de aplicação em diversos setores, principalmente nas aplicações cujo PEBD é dominante devido a suas estruturas moleculares ramificadas com cadeias longas (Figura 5) com alto peso molecular e por ter boa cristalização e estabilidade térmica (Francesca Signori, 2009).

**Figura 5:** Estrutura molecular do PBAT



Fonte: (Azevedo, 2016)

A degradação do PBAT ocorre em condições de compostagem pela ação microbiana em condições favoráveis, transformando-se em CO<sub>2</sub> e biomassa. É um polímero que pode ser usado em técnicas de processamento convencionais como moldagem por injeção, extrusão, extrusão de filmes, sopro, termoformagem e manufatura aditiva; por ser um polímero sintético tem uma aplicabilidade industrial, sendo possível produção em larga escala, não exigindo mudanças de maquinário em relação aos polímeros comuns. Uma maneira muito comum de se utilizar o PBAT é em blendas, as mais comuns são feitas com PLA ou amido termoplástico, pois suas

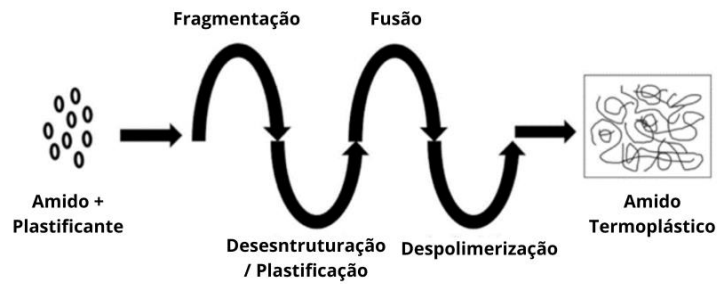
propriedades não são suficientemente satisfatórias para o consumidor final. Além de ter um alto custo de produção, a adição de amido leva a uma redução desse custo e aceleração da biodegradação, já ao adicionar PLA há uma melhora nas propriedades, deixando mais atrativo e mantendo as características biodegradáveis. Quando o PBAT é blendado com amido termoplástico, é necessário realizar a secagem do material antes de seu processamento devido às características higroscópicas que fazem com que o material absorva umidade, podendo, assim, prejudicar seu resultado (Xiaosong Zhai, 2020).

### **3.5.2 Amido Termoplástico**

Para a finalidade de desenvolver novos materiais poliméricos derivados de fontes renováveis, o amido é uma das fontes mais promissoras devido ao seu baixo custo e grande disponibilidade, pode ser produzido em larga escala por todo o mundo e o Brasil possui destaque na produção desse insumo. (Miranda, et al., 2011). O amido pode ser encontrado na forma de grânulos, que são partículas semicristalinas cujo tamanho, formato e morfologia variam de acordo com sua origem. Esses grânulos são insolúveis em água, e suas propriedades são influenciadas pelo teor de amilose e amilopectina; a hidrofobicidade do amido é determinada pela presença de grupos hidroxilas. (Morán, et al., 2013). Em sua forma granular, o amido não constitui um termoplástico.

O amido termoplástico é uma substância homogênea preparada com amido, que pode ser oriundo das mais diversas fontes, e água ou algum outro plastificante como glicerol, sorbitol, glucose ou ainda outros compostos contendo nitrogênio. Os plastificantes têm como objetivo penetrar nos grânulos do amido e romper a estrutura cristalina inicial pela ação de temperatura e forças de cisalhamento, fazendo com que a estrutura semicristalina do material sofra uma transformação termomecânica, sendo desestruturado em um polímero amorfo devido ao rompimento das ligações de hidrogênio intra e intermoleculares, apresentando um aspecto gelatinoso. Ao atingir esse estado, o polímero flui como qualquer outro polímero convencional, sendo capaz de passar por processos de injeção, extrusão e compressão. Posteriormente sofre um rearranjo da sua estrutura molecular e se torna o TPS (*Thermoplastic Plasticized Starch*) (Martinez Villadiego, 2022).

**Figura 6:** Processo de plastificação do amido termoplástico



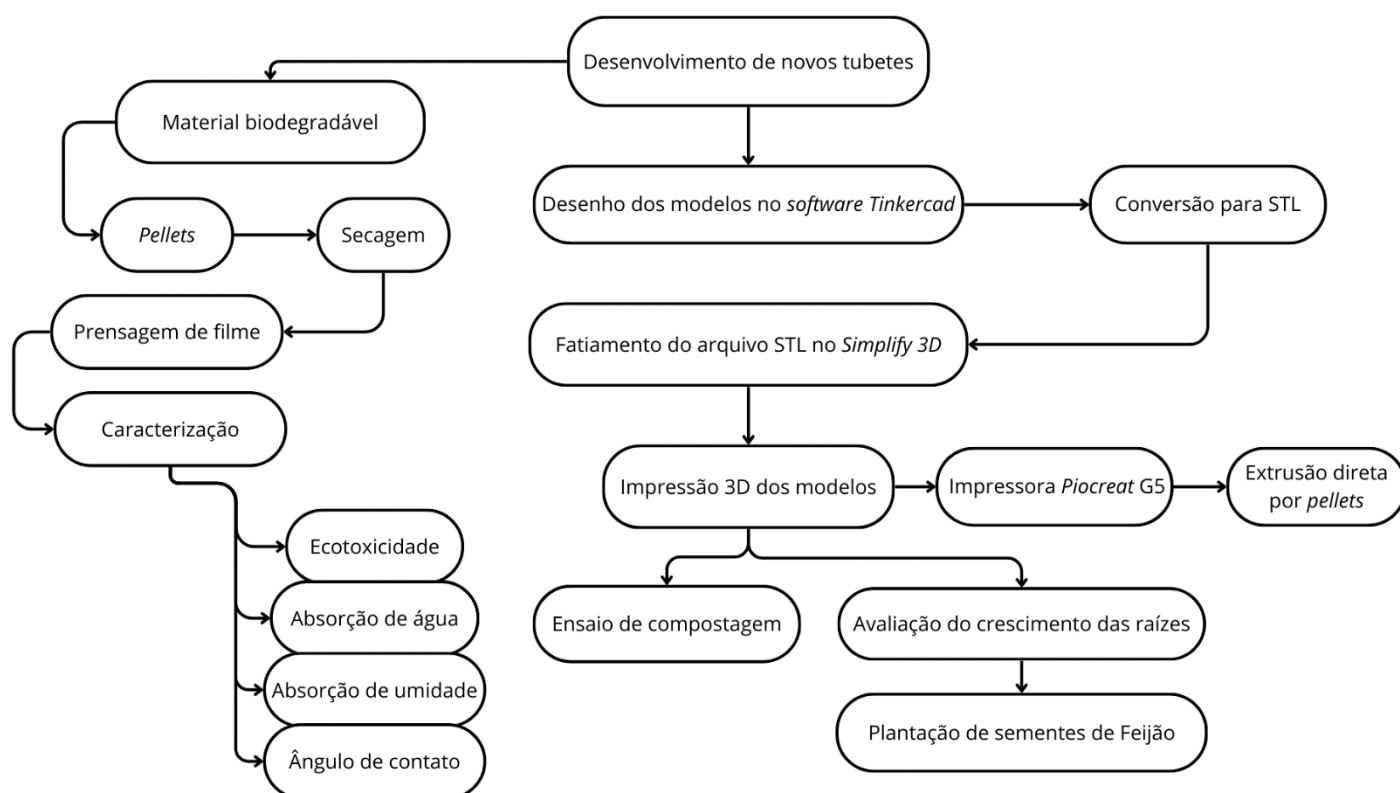
Fonte: Adaptado de (Martinez Villadiego, 2022)

O amido é uma das fontes naturais de polímeros mais promissoras por ser uma matéria prima abundante, barata, biodegradável e de fácil aquisição, sendo uma das principais alternativas aos polímeros de fontes não renováveis. O ponto de fusão do amido é mais alto que a temperatura de decomposição, devido à sua baixa estabilidade térmica. Por esse motivo se faz necessário melhorar tais propriedades com o desenvolvimento de blendas com melhores propriedades (Kaseem, et al., 2012).

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia empregada neste trabalho envolveu os procedimentos descritos na Figura 7. Primeiramente foram desenhados os modelos de tubetes no software *Tinkercad* e convertidos na extensão STL para posteriormente serem programadas as camadas de impressão no *software* de fatiamento *Simplify*, gerando um arquivo *gcode* que pode ser lido em qualquer impressora 3D. No caso deste trabalho a impressora utilizada foi a *Piocreteat G5* com a tecnologia de extrusão direta por *pellets*, os parâmetros de impressão serão descritos nesse capítulo. Os *pellets* utilizados foram de um material biodegradável composto de PBAT e amido termoplástico.

Figura 7: Fluxograma representando as etapas práticas do procedimento experimental



### 4.1 Impressão 3D

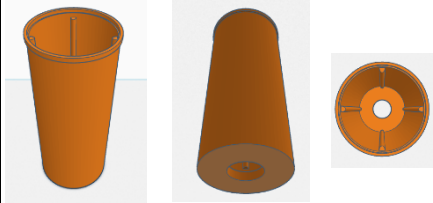
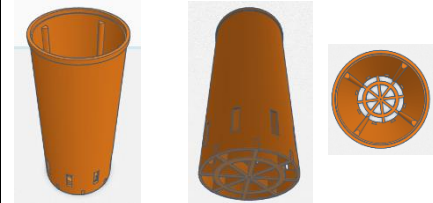
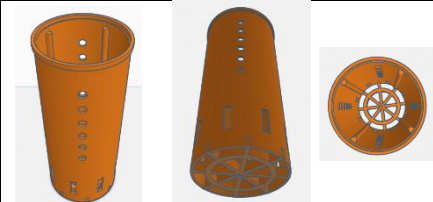
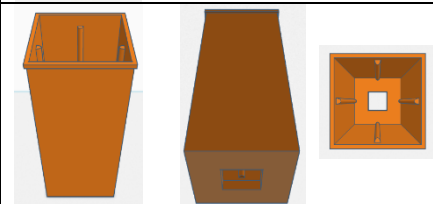
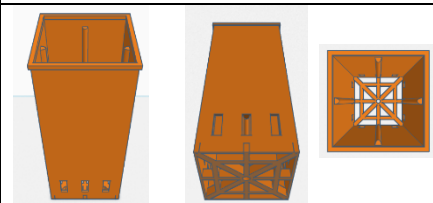
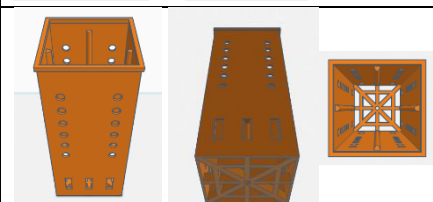
#### 4.1.1 Desenho dos modelos

Os modelos de tubetes foram desenhados no *software* de modelagem 3D *Autodesk Tinkercad*, unindo as características de capacidade volumétrica dos sacos de polietileno com os vincos de direcionamento de crescimento das raízes dos tubetes comerciais. Foram desenhados



dois formatos de tubetes: um cilíndrico e um paralelepípedo, com três (3) variações em cada um, conforme a Tabela 1. As características alteradas foram a base do tubete para avaliar a influência no escoamento final das raízes, as aberturas na parede lateral para avaliar a influência no crescimento das raízes secundárias e a possível diminuição de peso com estas aberturas; todos os modelos possuem 4 vincos nas paredes internas.

**Tabela 1:** Nomenclatura e relação dos modelos de tubetes desenhados

<b>Amostra</b>	<b>Formato</b>	<b>Base</b>	<b>Parede Externa</b>	<b>Modelo 3D</b>
A	Cilindro	Uma abertura	Sem aberturas	
B	Cilindro	Diversas aberturas	Aberturas na base	
C	Cilindro	Diversas aberturas	Aberturas na base e na lateral	
D	Paralelepípedo	Uma abertura	Sem aberturas	
E	Paralelepípedo	Diversas aberturas	Aberturas na base	
F	Paralelepípedo	Diversas aberturas	Aberturas na base e na lateral	

#### 4.1.2 Prototipagem via Manufatura Aditiva

Depois de desenhados, os modelos foram salvos na extensão STL para então serem fatiados no software “*Simplify 3D*” e assim gerando um “*gcode*” que é a sequência de dados lida pela impressora para realizar a deposição das camadas da manufatura aditiva. Os principais parâmetros utilizados para a impressão do material biodegradável estão descritos na Tabela 2.

**Tabela 2:** Parâmetros utilizados para impressão 3D do material biodegradável

<b>Parâmetro</b>	
Diâmetro do bico	0,8 mm
Multiplicador de extrusão	1
Velocidade de retração	30 mm/s
Distância de retração	10 mm
Altura da camada	0,5 mm
Camadas de topo/fundo/paredes	0/5/2
Linhas de borda	30
Suporte	Não
Preenchimento	100% e retilíneo
Temperatura de extrusão	150°C
Temperatura da mesa	20°C
Velocidade do refrigerador	0% na primeira camada e 100% no restante
Velocidade de impressão	25 mm/s

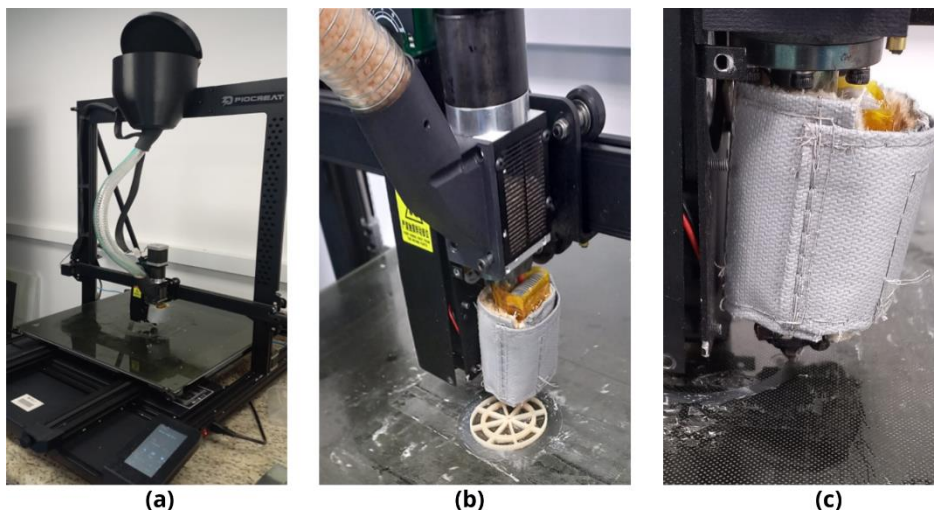
Para definir a temperatura de extrusão foram realizados testes até ser encontrada a temperatura ideal, considerando que a temperatura de fusão do material biodegradável é de 130°C, utilizou-se a temperatura de 150°C para a impressão 3D, vez que o tempo de residência no extrusor é muito curto e é necessário que o polímero atinja o estado fundido para que seja possível a deposição das camadas do processo de manufatura aditiva.

Comparado aos materiais convencionais, o material biodegradável possui um índice de fluidez menor e uma viscosidade maior, o que traz a necessidade de uma retração maior do polímero entre as camadas. Para a realização das impressões utilizou-se uma velocidade de retração de 30 mm/s e uma distância de retração de 10 mm, que é a distância que a rosca gira para o lado contrário com finalidade de recolher o material para que ele não fique grudado na camada depositada anteriormente.

A impressora utilizada para o desenvolvimento dos tubetes está retratada na Figura 8, destacando o funil de alimentação, que é por onde são colocados os *pellets* e o sistema de extrusão com a rosca de transporte interna, onde a temperatura é elevada para que o material

atinja o estado de fundido e possa chegar até o bico aquecido que deposita as camadas do material conforme o seu diâmetro de abertura.

**Figura 8:** (a) Impressora de *pellets* utilizada para a impressão dos modelos (G5 Piocreat); (b) Sistema de alimentação e de extrusão; (c) Bico extrusor.



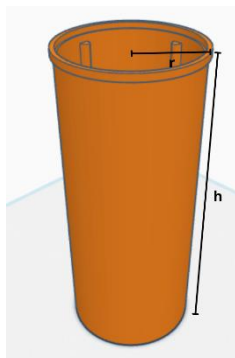
#### 4.1.3 Capacidade volumétrica

A capacidade volumétrica é um fator importante para a mudança das sacolas de polietileno para os tubetes de polietileno rígido, pois as sacolas suportam um volume maior, porém geram o aumento no custo de produção, de transporte e plantio da muda e a necessidade de uma maior área requerida de viveiro. (Melo, 1999). Enquanto os tubetes, por terem uma capacidade menor, utilizam quantidade reduzida de substrato, porém tem resultados inferiores em testes de qualidade de mudas. Como o objetivo do presente trabalho é a criação de novos modelos de tubetes que aliem as qualidades de ambas as soluções já presentes no mercado, foram comparadas as capacidades volumétricas das sacolas de polietileno, dos tubetes de polietileno rígido e dos tubetes desenvolvidos de material biodegradável.

As sacolas de polietileno possuem volume aproximado do 700 ml e os tubetes comerciais mais utilizados na plantação de café possuem cerca de 120 ml de capacidade (Cunha, 2002). O volume do tubete cilíndrico foi calculado utilizando a equação de volume do cilindro (1), e do tubete paralelepípedo, a equação de volume de paralelepípedo (2). Os valores utilizados estão relacionados na Figura 9 e na Tabela 3 para os tubetes cilíndricos e na Figura 10 e Tabela 4 para os tubetes paralelepípedos.

$$\text{Volume de cilindro} = \pi * r^2 * h \quad (1)$$

**Figura 9:** medidas relacionadas do tubete cilíndrico.

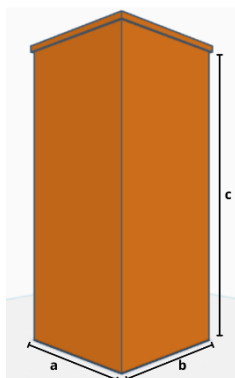


**Tabela 3:** Medidas do tubete cilíndrico

	r	h
Tubete Cilíndrico	2,5 cm	12 cm

$$\text{Volume de paralelepípedo} = a * b * c \quad (2)$$

**Figura 10:** Medidas relacionadas do tubete paralelepípedo.



**Tabela 4:** Medidas do tubete paralelepípedo

	a	b	c
Tubete Paralelepípedo	5	5	12

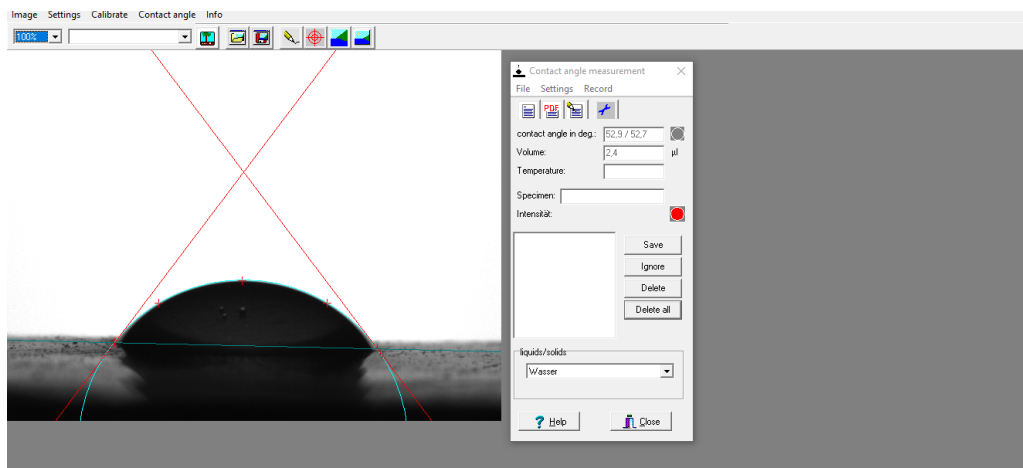
## 4.2 Ensaio

### 4.2.1 Ângulo de contato

Para avaliar a molhabilidade de algum material ou revestimento é realizada a medição do ângulo de contato que pode ser feita em relação a determinado líquido. No caso deste trabalho, a medição foi feita em relação à água para determinar a hidrofiliicidade do material. Para tanto, foi utilizado o microscópio digital e uma seringa com água destilada que controladamente liberava as gotas para realizar as medidas, amostras do material polimérico biodegradável prensadas com aproximadamente 1 mm de espessura assim como amostras de filmes de polietileno utilizados comercialmente em sacos para transporte de mudas. O teste é realizado pelo método de gota séssil, onde as gotas são colocadas na superfície da amostra em questão e uma imagem é gravada. A partir dessa imagem são medidos os ângulos de ambos os lados que a gota faz com a superfície.

Foram pingadas de três(3) a cinco(5) gotas em cada amostra e capturadas as imagens delas individualmente pelo *software Surfaceware*; as medidas foram feitas através do *software Surf tens 3.0 (OEG GmbH)* (Figura 11) em triplicata para cada gota para posteriormente calcular a média dos ângulos e desvio padrão das medidas.

**Figura 11:** Interface do Software Surf tens 3.0 (OEG GmbH)



#### 4.2.2 Biodegradação via compostagem

A biodegradação do material no formato dos tubetes foi avaliada pelo ensaio de compostagem baseado na norma ASTM G160-03. Foram utilizadas duas (2) amostras para cada modelo de tubete desenhado, conforme a Tabela 1 com espessura de 2 mm, altura de 120 mm e abertura com raio de 50 mm em média. Os tubetes foram enterrados envoltos em sacos de tule

para facilitar o manejo (Figura 12), e foram enterrados em terra com substrato de esterco de pássaro.

As amostras ficaram enterradas pelos tempos de trinta (30) e sessenta (60) dias, nos meses de novembro e dezembro de 2023. Após decorrido o tempo estabelecido, foram retiradas da compostagem, lavadas e secas em estufa a 35°C por cerca de 2 horas para a remoção de terra remanescente, depois foram pesadas para se mensurar a perda de massa durante o ensaio, que foi calculado conforme a equação (3).

$$\text{Perda de massa (\%)} = \left( \frac{m_i - m_f}{m_i} \right) * 100 \quad (3)$$

**Figura 12:** Amostras no ensaio de compostagem



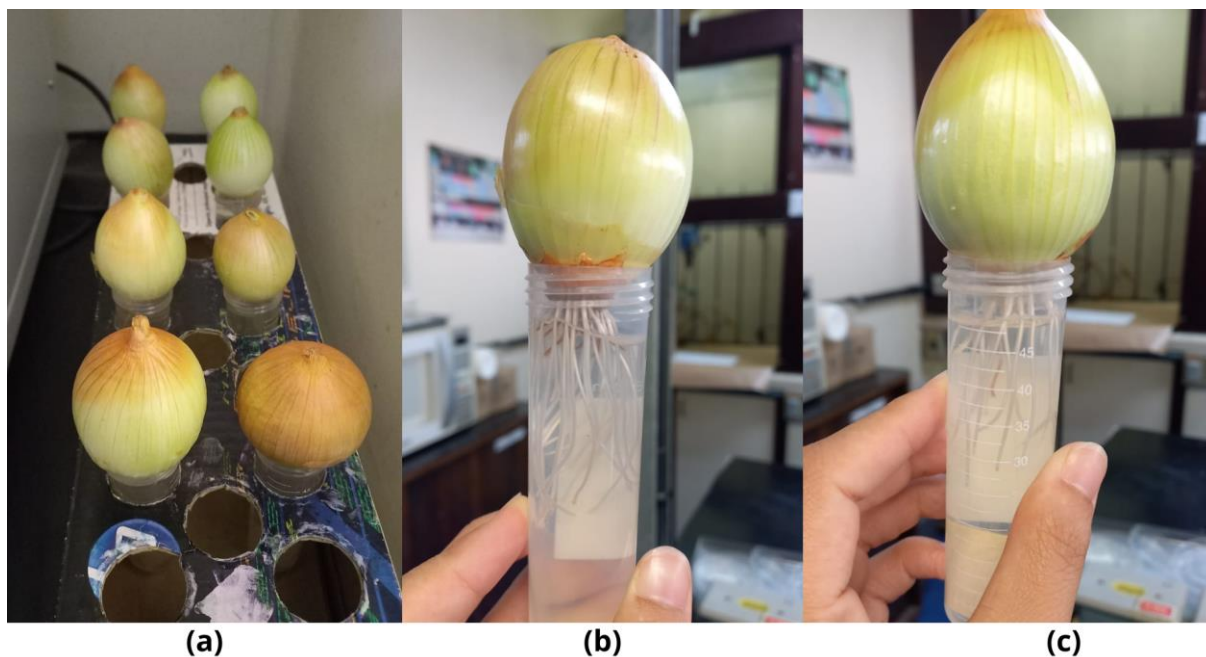
#### 4.2.3 Teste de ecotoxicidade

A análise da influência da ação de substâncias tóxicas no meio ambiente foi feita pelo teste da ecotoxicidade; o ensaio foi realizado baseado no método utilizado por Fiskesjö et al. (1985). As cebolas (*Allium cepa*) foram posicionadas no topo de tubos Falcon de maneira que as raízes ficassem submersas na água destilada (Figura 13) e foram feitas duas amostragens:



uma branca, apenas com água dentro do tubo para fins de controle e comparação e outra com uma placa de 2x2,5 cm pesando em torno de 0,9 gramas do material biodegradável utilizado no estudo. As amostras ficaram em ambiente com temperatura em torno de 20°C e em local protegido da luz do sol.

**Figura 13:** Teste de ecotoxicidade: (a) cebolas em contato com a água nos tubos Falcon; (b) amostra apenas com água; (c) amostra com o material biodegradável.



Após uma semana de exposição, as cebolas com menor crescimento das raízes foram descartadas e as outras tiveram suas raízes cortadas, restando três (3) amostras para cada composição. À medida que a água evaporava era repostada nos tubos e após duas (2) semanas de ensaio, as cebolas foram retiradas e medida a quantidade de raízes e tamanho delas com o auxílio de um paquímetro, assim como o pH da água foi medido com uma fita medidora de pH.

#### **4.2.4 Absorção de umidade**

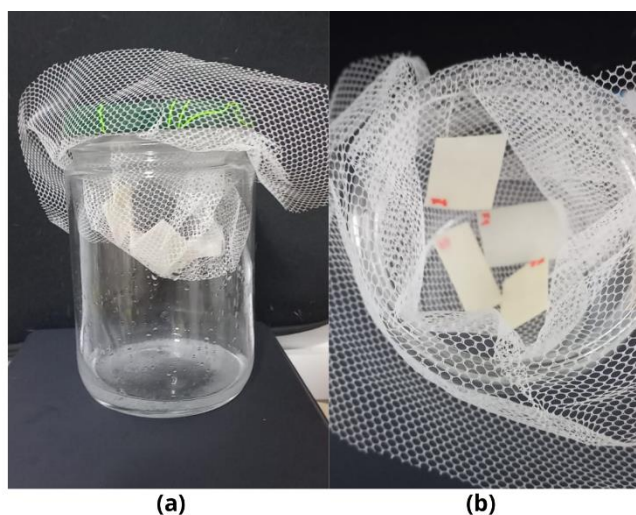
A análise do aumento de massa em um ambiente de umidade relativa controlada avalia propriedade de barreira de absorção de umidade a fim de se observar o comportamento do material quanto a sua higroscopicidade. O ensaio foi baseado na norma ASTM D5229/D5229M-92. Foram prensados filmes do material biodegradável e cortados nas dimensões de 2x3 cm, assim como os filmes de polietileno dos sacos de mudas comerciais para fins de comparação; o ensaio foi realizado em triplicata para cada material. As amostras foram

pesadas e depois colocadas nas câmaras de umidade com o suporte de um tule (Figura 14). Para o ambiente de umidade relativa foi utilizada uma solução de NaCl (Cloreto de Sódio) em água destilada com concentração de 75%, conforme a norma ASTM E104 – 02.

As amostras foram secas em uma estufa a 35°C por 1h antes da primeira pesagem, logo após foram colocadas nas câmaras e levadas à estufa pelo tempo de ensaio. Foram feitas duas pesagens, uma em vinte e quatro (24) e outra em quarenta e oito (48) horas de exposição; para calcular o ganho de massa foi utilizada a equação 4, onde  $m_f$  é a massa final e  $m_i$  a massa inicial.

$$\text{Ganho de massa (\%)} = \left( \frac{m_f - m_i}{m_i} \right) * 100 \quad (4)$$

**Figura 14:** Ensaio de absorção de umidade: (a) câmara de umidade relativa 75%, (b) amostras apoiadas no tule para ficarem imersas na câmara

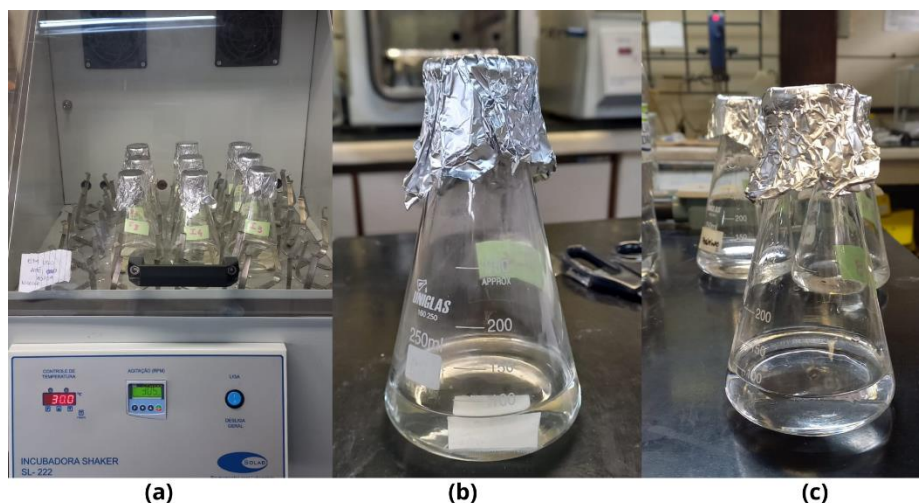


#### 4.2.5 Absorção de água

Para realização do ensaio de absorção de água foi utilizado o método proposto por Fakhouri et al (2013) com cinco (5) filmes prensados de 2x3 cm do material biodegradável com espessura de aproximadamente 1 mm que foram colocadas no dessecador por 24 horas, e cinco (5) filmes de polietileno foram preparados da mesma maneira; todas amostras foram pesadas e imersas em 50 ml de água destilada em *Erlenmeyers* que foram fechados com papel alumínio e levados para a incubadora *shaker* (Solab, modelo SL-222) com agitação orbital de 30 rpm a 30 °C por 24 horas (Figura 15). Após decorrido o tempo de ensaio, as amostras foram retiradas dos *Erlenmeyers* e com um papel toalha foi removido o excesso de água para pesagem e cálculo da absorção de água, conforme a equação 1, utilizada para o cálculo de absorção de umidade.



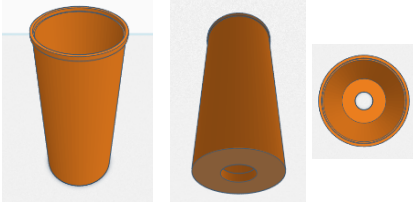
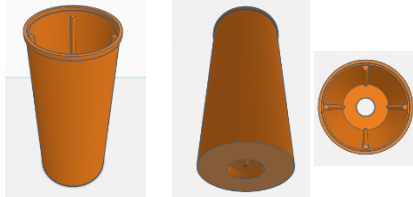
**Figura 15:** Ensaio de absorção de água: (a) Amostras na incubadora; (b) Erlenmeyer com amostra do filme biodegradável; (c) Erlenmeyer com filme de polietileno

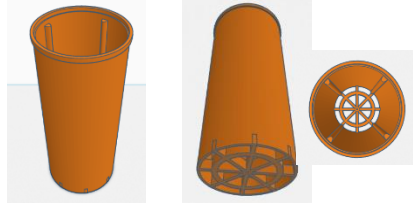
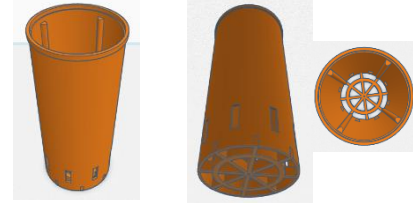
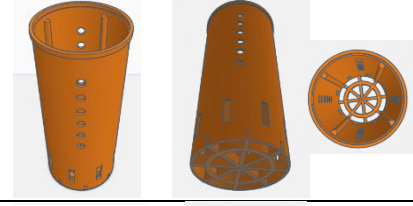
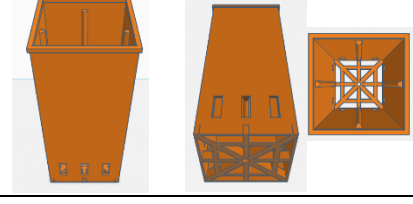


### 4.3 Crescimento das raízes

O crescimento das raízes foi avaliado plantando sementes de feijão em modelos de tubete projetados para observação da influência das características nas variáveis morfológicas das plantas de maneira separada. Foram escolhidas as sementes de feijão devido ao fato de possuírem o mesmo mecanismo de crescimento do café, porém com tempo de germinação reduzido. O objetivo do ensaio foi relacionar as alterações nos modelos de tubetes com o crescimento das raízes em tamanho e saúde da planta. Os modelos de tubetes utilizados estão elencados na Tabela 5; o ensaio foi feito em triplicata.

**Tabela 5:** Nomenclatura e relação dos modelos de tubetes utilizados na avaliação do crescimento das raízes.

Amostra	Formato	Vincos	Base	Parede Externa	Modelo 3D
I	Cilindro	Sem	Uma abertura	Sem aberturas	
II	Cilindro	4	Uma abertura	Sem aberturas	

III	Cilindro	4	Diversas aberturas	Sem aberturas	
IV	Cilindro	4	Diversas aberturas	Aberturas na base	
V	Cilindro	4	Diversas aberturas	Aberturas na base e na lateral	
VI	Paralelepípedo	4	Diversas aberturas	Aberturas na base	

É possível observar que algumas variações foram feitas apenas para os tubetes com o formato cilíndrico, devido a este ser similar aos tubetes comerciais mais utilizados, sendo o paralelepípedo menos utilizado no mercado, razão pela qual algumas características não foram testadas para esse formato. Para comparar o desenvolvimento de crescimento das raízes em relação aos modelos produzidos foram avaliadas as variáveis morfológicas de altura da parte aérea (H), diâmetro do colo (D), relação H/D, matéria seca do sistema radicular e altura do sistema radicular. Os parâmetros foram definidos baseados no ensaio realizado por Bomfim et al (2009).

As sementes foram enterradas com 1 cm de distância do topo do tubete e foram molhadas a cada 24 horas para manter o ambiente úmido. O ensaio foi realizado durante vinte (20) dias, tempo suficiente para a germinação do feijão; decorrido esse tempo, as mudas foram removidas dos tubetes e as variáveis morfológicas foram medidas. As dimensões de altura da parte aérea, diâmetro do colo e altura do sistema radicular foram mensuradas logo após a remoção do tubete, a seguir a parte aérea foi separada do sistema radicular que foi lavado para a remoção do excesso de terra, seco em estufa a 30°C por duas (2) horas e pesado para determinação da massa.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Impressão 3D

#### 5.1.1 Desenho dos modelos

Foram desenvolvidos seis modelos para o ensaio de degradação e algumas características deles foram selecionadas e projetados outros modelos para a comparação do crescimento de raízes a partir desses aspectos específicos. Os tubetes foram desenhados com a finalidade de aliar a capacidade volumétrica das sacolas de polietileno com a prevenção do enovelamento das raízes que os tubetes de polietileno comercialmente vendidos apresentam. A Figura 16 contém imagens das sacolas e dos tubetes de polietileno existentes no mercado e utilizados para plantação de café.

**Figura 16:** Tubete e Sacolas de Polietileno

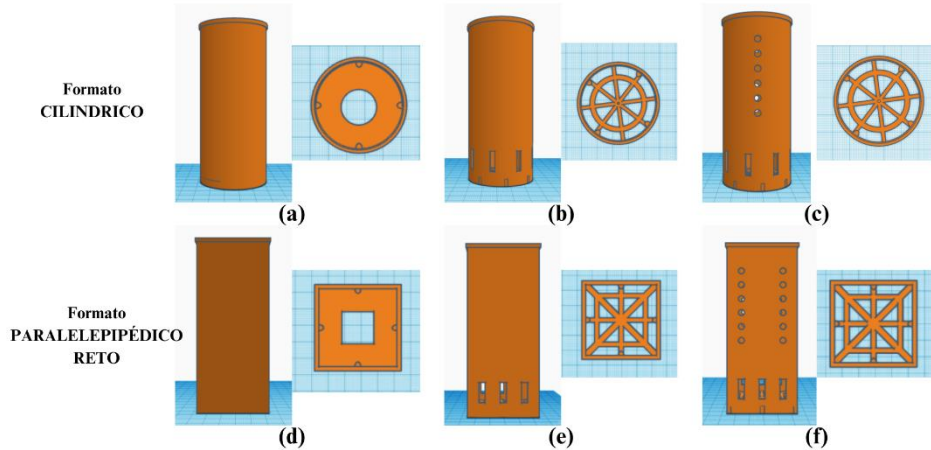


Fonte: nutricaoadesafra.com.br, 2022

Para se equiparar com o volume das sacolas, todos os tubetes foram projetados com diâmetro interno de 50 mm e altura de 120 mm, sendo cilindros retos sem afunilamento no fundo como os tubetes comerciais com 2 mm de espessura das paredes, buscando assim uma diminuição da massa, uma melhor maleabilidade do tubete e uma degradação mais rápida

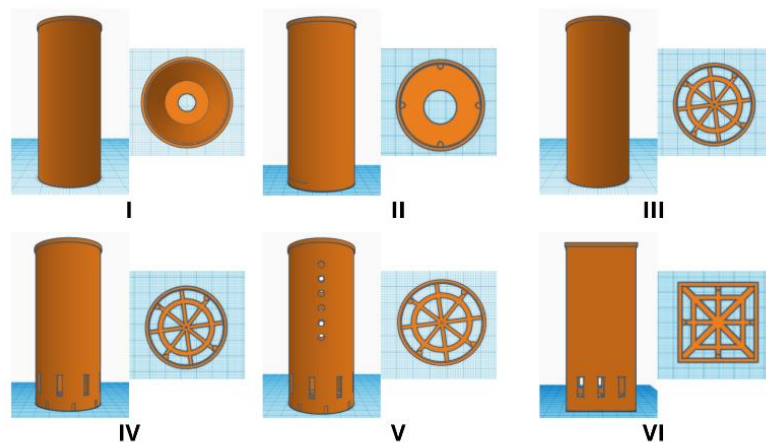
quando em contato com os ambientes similares aos de plantação. Os desenhos em três dimensões dos modelos desenvolvidos para o ensaio de degradação estão representados na Figura 17.

**Figura 17:** Desenhos dos tubetes em 3 dimensões utilizados para o ensaio de degradação



Os demais modelos desenvolvidos para comparar aspectos específicos presentes nos tubetes estão representados na Figura 18. O objetivo foi comparar a influência dos vincos internos, do desenho do fundo, da presença de aberturas na parte inferior das paredes, da presença de aberturas na parte lateral das paredes e da diferença de formato entre cilíndrico e paralelepípedo reto.

**Figura 18:** Desenho dos tubetes em 3 dimensões utilizados para a avaliação do crescimento das raízes



### 5.1.2 Prototipagem via Manufatura Aditiva

As impressões foram feitas em uma impressora de extrusão direta por *pellets* com o material biodegradável seguindo os parâmetros de impressão descritos na Tabela 2 que foram programados no software de fatiamento de modelos tridimensionais “*Simplify 3D*”. Para uma melhor aderência da primeira camada na mesa da impressora o sistema de refrigeração foi mantido desligado durante a deposição de mesma, refrigerando com 100% da velocidade apenas a partir da segunda camada; também para uma adesão mais efetiva utilizou-se o recurso de impressão de uma camada de borda, chamada de “*brim*”, com vinte linhas para assegurar a qualidade da primeira camada (Figura 19).

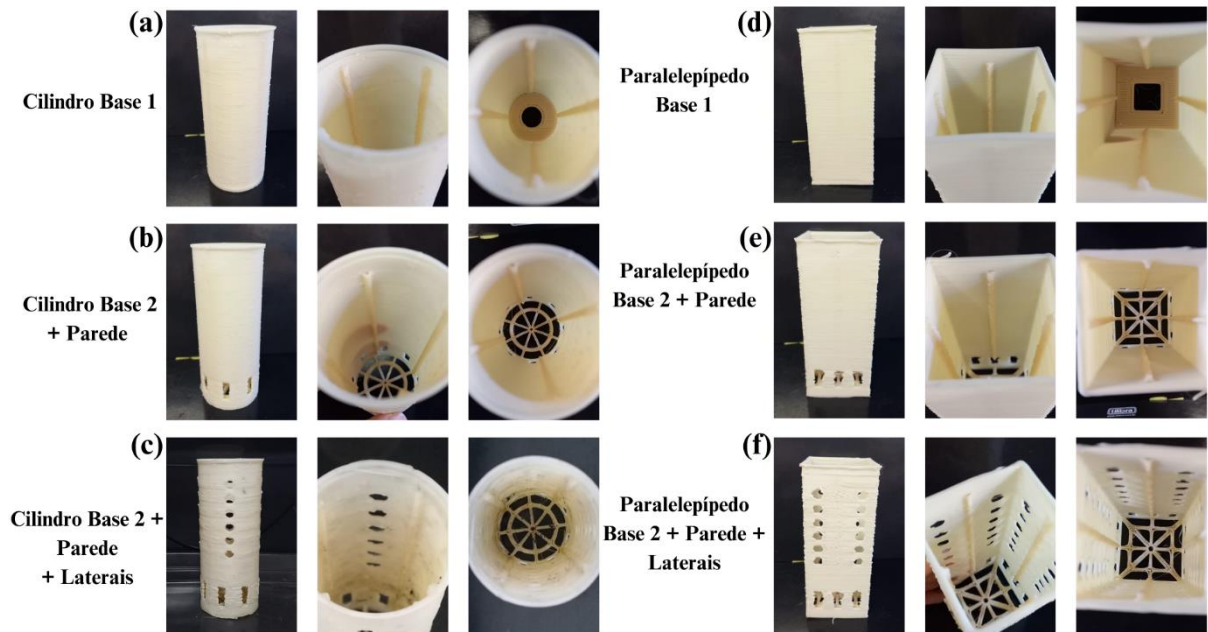
**Figura 19:** Camada de borda da impressão 3D



Os tubetes que foram feitos na impressora por extrusão direta de *pellets* estão retratados na Figura 20 sob três (3) perspectivas para possibilitar a visualização de suas características.

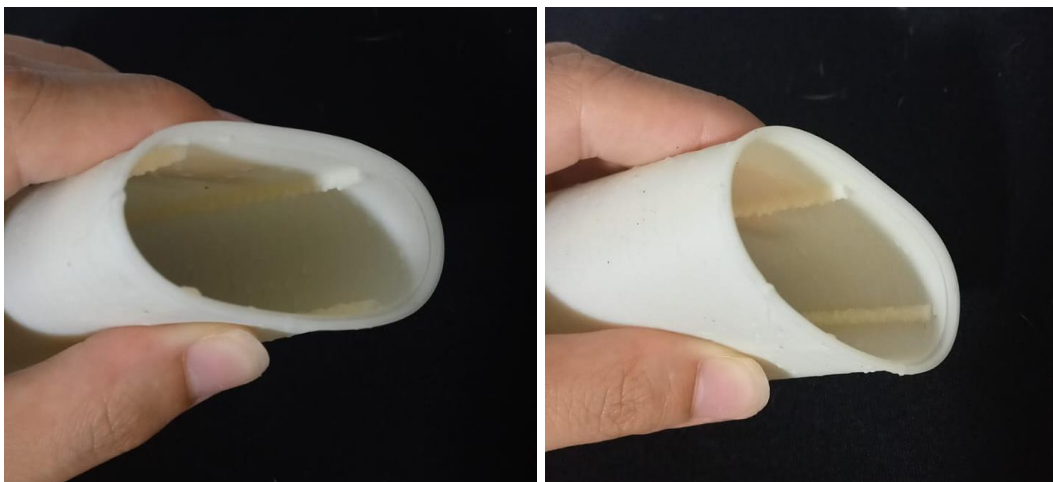


**Figura 20:** Modelos de tubetes impressos via manufatura aditiva com material biodegradável



Para todos os modelos desenhados foi possível realizar a impressão via manufatura aditiva, promovendo uma boa adesão entre camadas. Os orifícios nas paredes laterais dos tubetes apresentaram algumas falhas devido à dificuldade de deposição do polímero sobre camadas que possuem aberturas. Os modelos também apresentaram uma flexibilidade aparente, como pode ser observado na Figura 21, devido à característica do material e ao fato de sua espessura de parede ser baixa, podendo ser uma característica favorável para o crescimento das raízes.

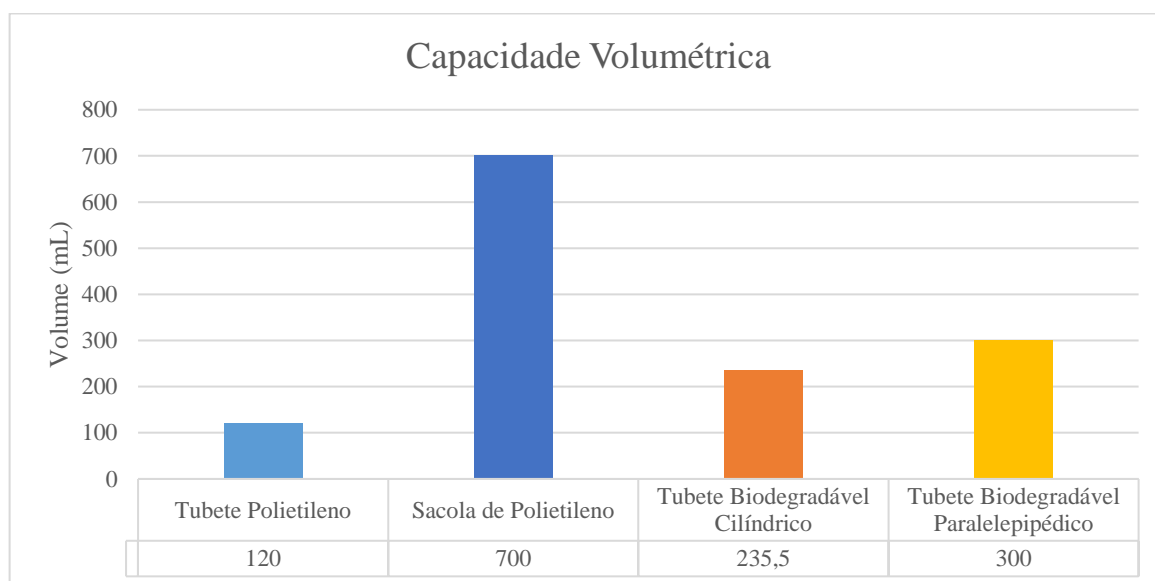
**Figura 21:** Demonstração da flexibilidade aparente dos tubetes impressos



### 5.1.3 Capacidade volumétrica

A comparação entre as capacidades volumétricas dos tubetes que foram desenvolvidos no presente trabalho e das soluções comerciais de polietileno (sacola e tubete) está demonstrada na Figura 22.

**Figura 22:** Comparação da capacidade volumétrica dos tubetes desenvolvidos com os produtos comerciais de polietileno



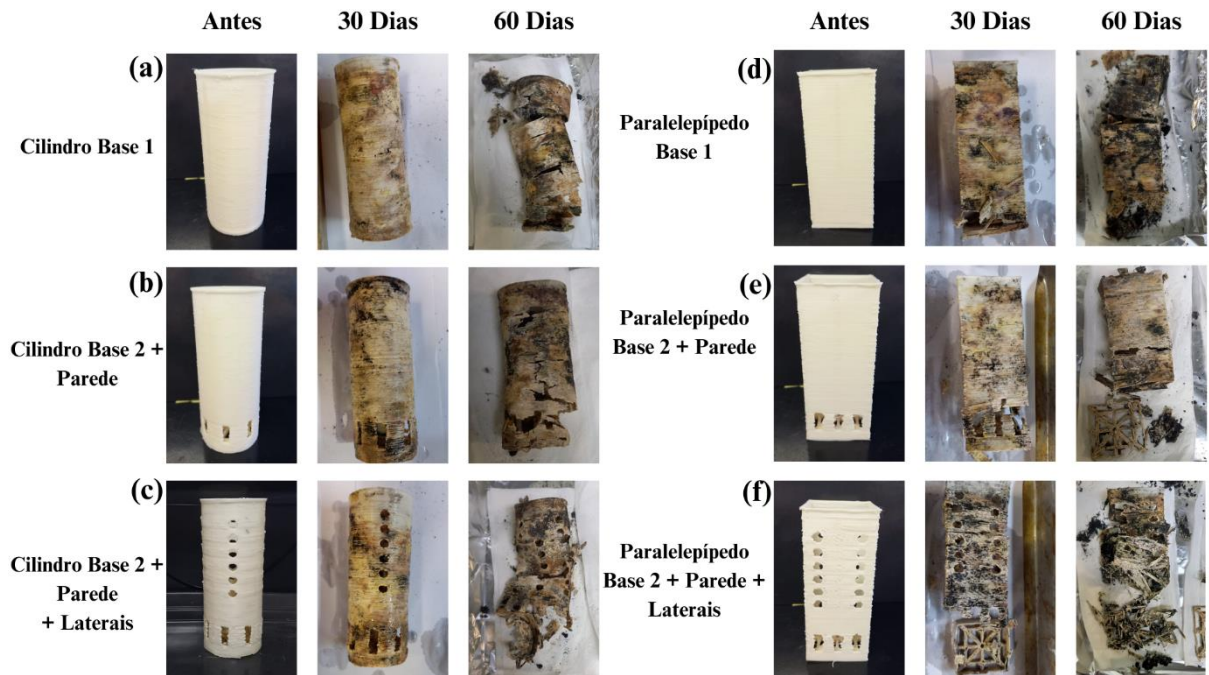
O resultado dos volumes calculados para os tubetes biodegradáveis é promissor visto que há um aumento da capacidade em relação ao tubete de polietileno, porém não atinge um valor tão alto como o das sacolas ao ponto de aumentar o custo da produção das mudas pela quantidade necessária de substrato a ser utilizada, destacando-se o tubete paralelepípedico, provavelmente influenciado pela maior área.

## 5.2 Propriedades

### 5.2.1 Biodegradação via Compostagem

A biodegradação dos tubetes foi avaliada pela realização do teste de compostagem pelos períodos de trinta (30) e sessenta (60) dias. A Figura 23 mostra o aspecto dos tubetes antes e após a retirada do ensaio. Observa-se a influência do formato e da presença de paredes com orifícios na velocidade de degradação dos tubetes, destacando-se a maior desintegração em 2 meses entre o formato cilíndrico o modelo (c) e entre o formato paralelepípedico o modelo (f).

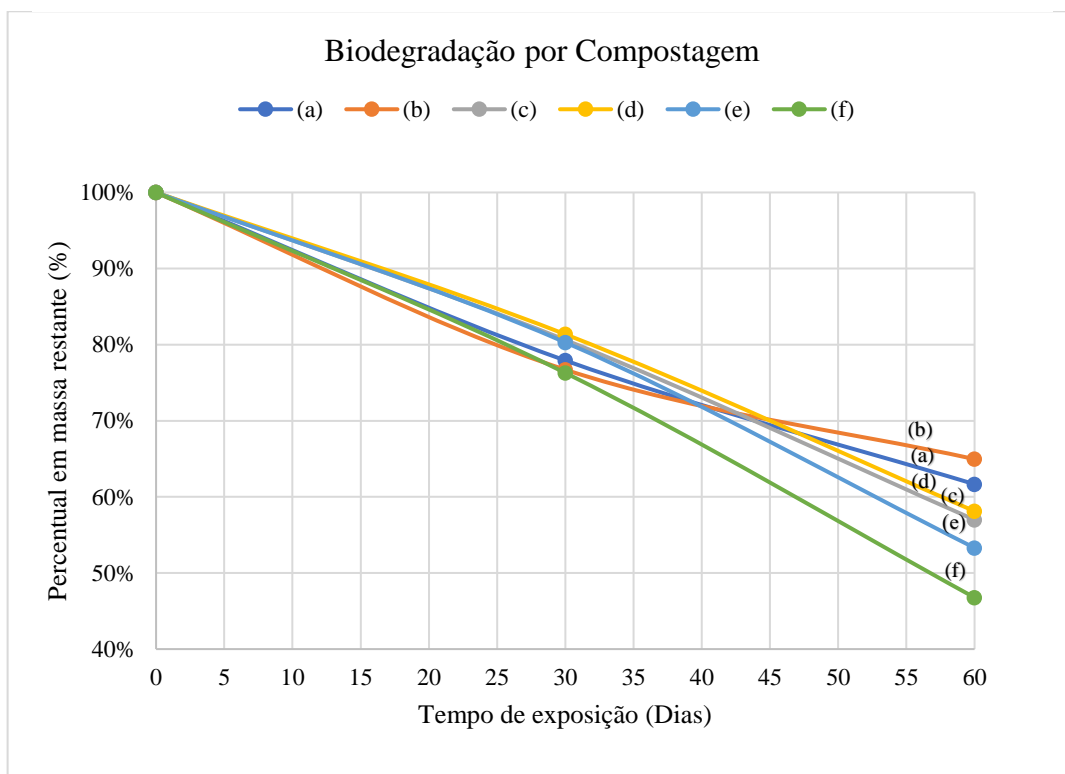
**Figura 23:** Aspecto dos tubetes antes e após o tempo de compostagem do ensaio



A perda de massa está representada no gráfico da Figura 24, em que é possível observar que todos os modelos tiveram perda de massa de, em média, 43% nos trinta (30) primeiros dias e em sessenta (60) dias de ensaio a perda foi de 56% em média.



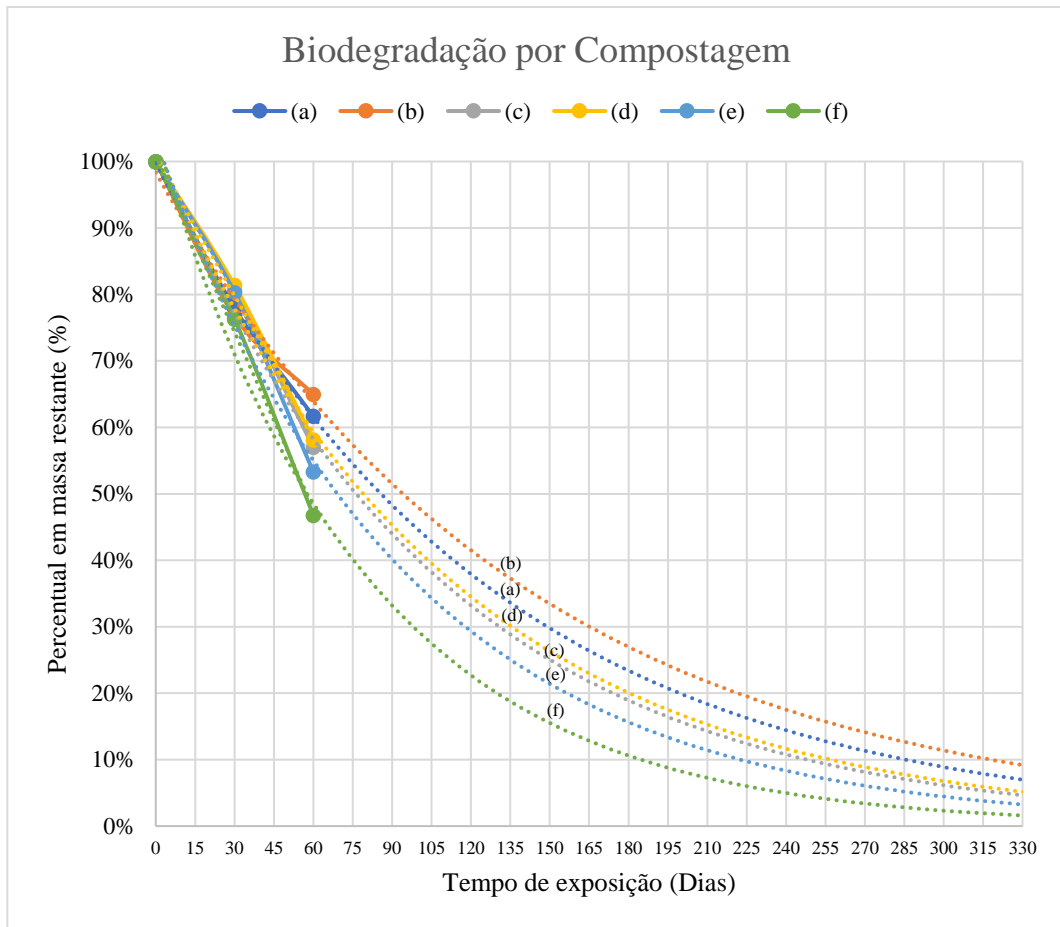
**Figura 24:** Massa restante (%) por tempo de ensaio (dias) dos tubetes avaliados via compostagem.



Dentre os modelos de cilindro o (c) teve a maior perda e dentre os modelos paralelepípedicos o (f) teve a maior perda, o que pode ser explicado devido as aberturas laterais que deixam o tubete com menor massa e com maior área de contato com o ambiente, tornando mais propício a perder massa. Quanto às falhas que podem ser observadas nos tubetes após a compostagem, elas ocorreram devido ao descolamento e delaminação das camadas de impressão 3D, causados pela fragilização do material no meio exposto.

Com base no comportamento de cada modelo representado no gráfico plotado para a determinação da taxa de degradação (Figura 24) foi feita uma extrapolação, que é o processo de construção de novos pontos que se encontram fora dos limites dos pontos conhecidos, em que se estimou o tempo de exposição necessário para que cada modelo de tubete chegasse em 50%, 25% e 10% de massa restante. Na Figura 25 está ilustrado graficamente o comportamento de cada modelo e na Tabela 6 constam os valores calculados.

**Figura 25:** Extrapolação logarítmica do tempo de exposição para degradação de cada modelo de tubete



**Tabela 6:** Tempo de exposição calculado para ocorrer a amostra em 50%, 25% e 10%.

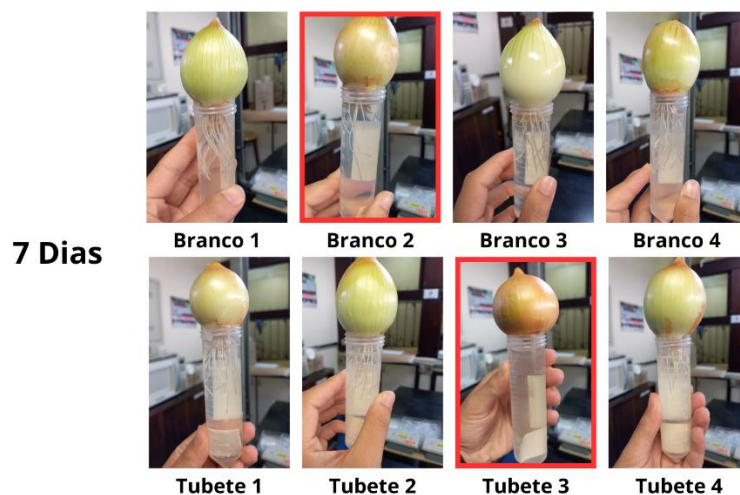
Equações		R <sup>2</sup>	Percentual em massa restante (%)		
			50%	25%	10%
(a)	$y = 0,9974e^{-0,008x}$	0,9997	86	173	287
(b)	$y = 0,9837e^{-0,007x}$	0,9843	97	196	327
(c)	$y = 1,0222e^{-0,009x}$	0,9812	79	156	258
(d)	$y = 1,0219e^{-0,009x}$	0,9802	79	156	258
(e)	$y = 1,0322e^{-0,01x}$	0,968	72	142	233
(f)	$y = 1,0371e^{-0,013x}$	0,9711	56	109	180

Observando os valores calculados para o tempo de exposição é possível concluir que o modelo (f) teria o menor tempo para degradar até chegar em 10% da sua massa original, esse modelo possui as aberturas nas paredes laterais que aumentam a superfície de contato com o meio, levando a uma degradação mais acelerada. Essa estimativa calculada a partir da equação de cada extrapolação logarítmica demonstrou um resultado em que os tubetes de formato paralelepípedo degradam mais rapidamente que os cilíndricos.

## 5.2.2 Ecotoxicidade

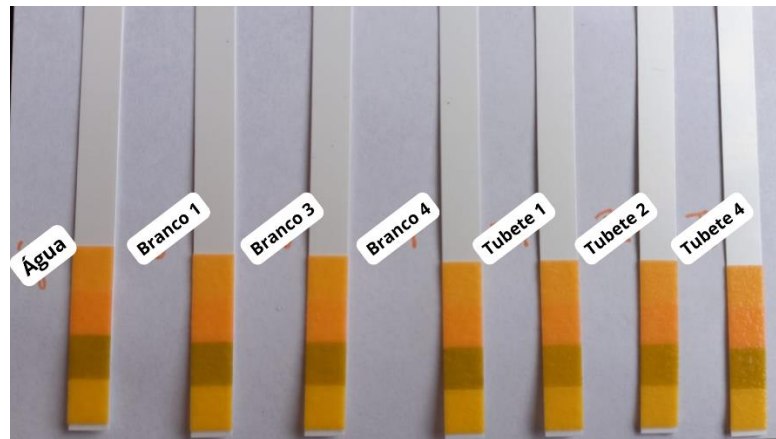
A degradação de materiais pode envolver a eliminação de compostos prejudiciais ao meio ambiente. Para avaliar o efeito do material biodegradável do estudo foi feito o teste de ecotoxicidade. Foram nomeadas como “Tubete 1, 2, 3 e 4” as amostras contendo uma placa de 2x3 cm do material biodegradável e “Branco 1, 2, 3 e 4” as amostras em que as cebolas ficaram imersas apenas em água, para fins de comparação. Após a primeira semana em imersão, as cebolas com menor crescimento das raízes foram descartadas e as demais tiveram as raízes recortadas e recolocadas nos tubos Falcon em contato com água para seguir os próximos sete dias em imersão, conforme a Figura 26, em que estão em vermelho as cebolas que foram removidas do ensaio.

**Figura 26:** Cebolas após uma semana de ensaio



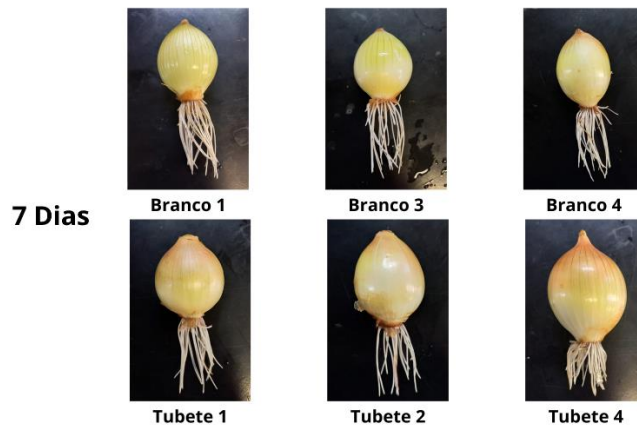
Em duas semanas o ensaio foi finalizado e não foi observado nenhum tipo de desintegração da amostra biodegradável assim como não houve alteração no pH ou na translucidez da água (Figura 27).

**Figura 27:** Medição de pH das amostras após o término do ensaio.

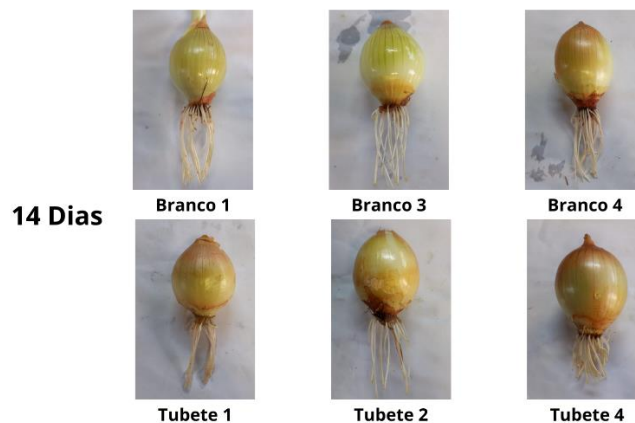


Foram comparados os comprimentos e o número de raízes das cebolas para se avaliar a influência do material biodegradável quanto à liberação de resíduos tóxicos. As cebolas ao final de sete (7) e quatorze (14) dias de imersão estão representadas na Figura 28 e na Figura 29, respectivamente.

**Figura 28:** Crescimento das raízes das cebolas após 7 dias de ensaio

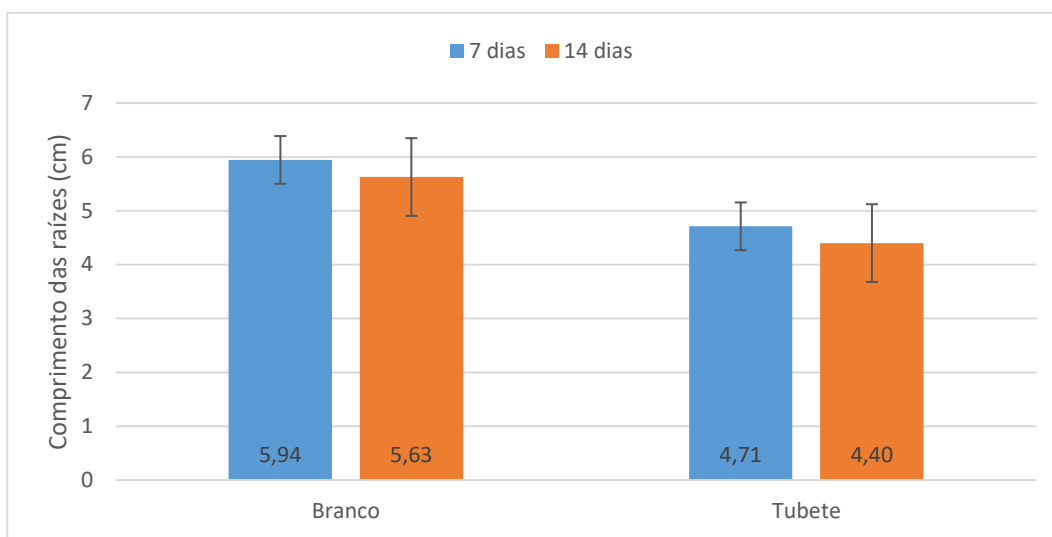


**Figura 29:** crescimento das raízes das cebolas após 14 dias de ensaio

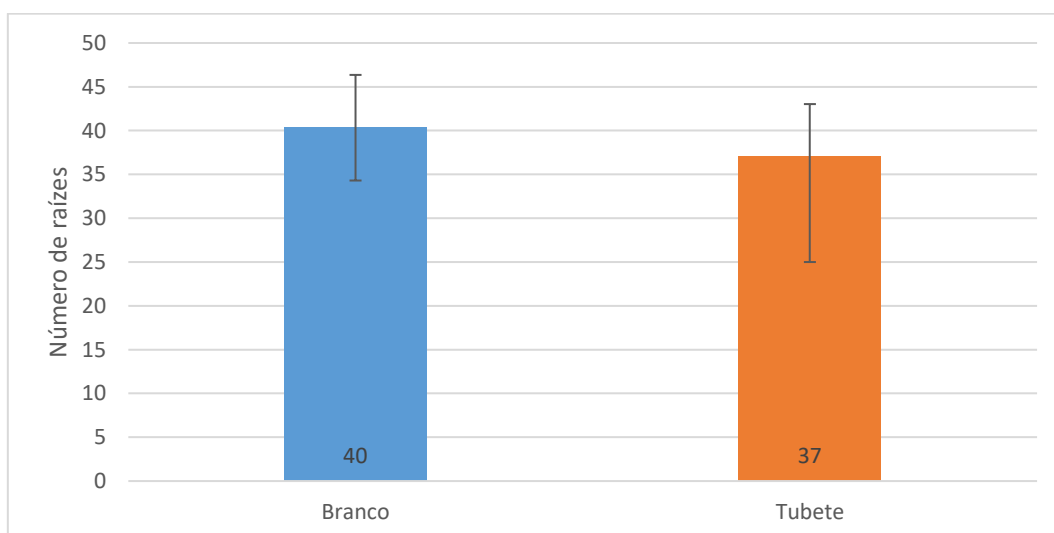


Tanto o número quanto o comprimento das raízes ficaram em valores muito próximos em ambas amostras, sendo que nas que continham o material biodegradável se observou um crescimento 5% menor no comprimento (Figura 30) e 8% menor no número de raízes após o período de 2 semanas de ensaio (Figura 31).

**Figura 30:** Comprimento médio das raízes das cebolas no ensaio de ecotoxicidade das amostras contendo o material biodegradável (Tubete) e apenas com água (Branco).



**Figura 31:** Quantidade média de raízes nas cebolas do ensaio de ecotoxicidade das amostras contendo o material biodegradável (Tubete) e apenas com água (Branco).



Com o ensaio de ecotoxicidade é possível concluir que mesmo com um crescimento menor de quantidade e comprimento das raízes nas cebolas do ensaio, o material biodegradável não se desintegrou na água e não causou nenhuma alteração de turbidez ou pH da água.

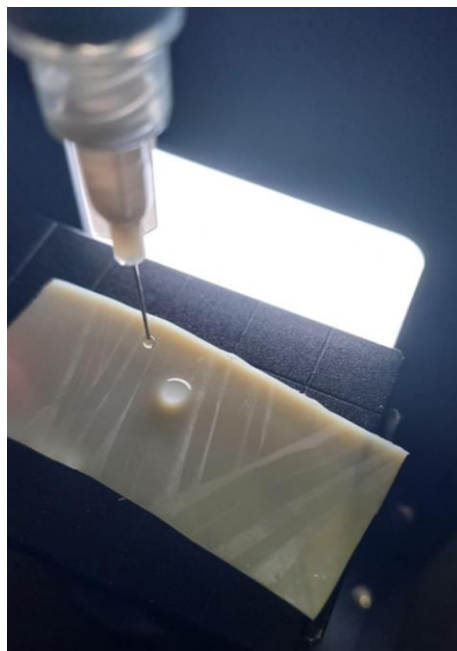
### 5.2.3 Ângulo de contato

O ângulo de contato permite tirar conclusões acerca da afinidade do material com a água: uma medida menor desse ângulo indica a hidroflicidade, pois a gota se espalha mais pela superfície, e uma medida maior indica a hidrofobicidade pois o espalhamento é menor. Na Figura 32 é possível observar o espalhamento formado pela gota de água na superfície do filme feito a partir do material biodegradável. Em cada filme foram pingadas três (3) gotas de água destilada e em cada uma delas foram feitas seis (6) medidas de ângulo em ambos os lados. O método pode ser observado na Figura 33.

**Figura 32:** Imagem capturada da gota pingada sobre o filme do material biodegradável.

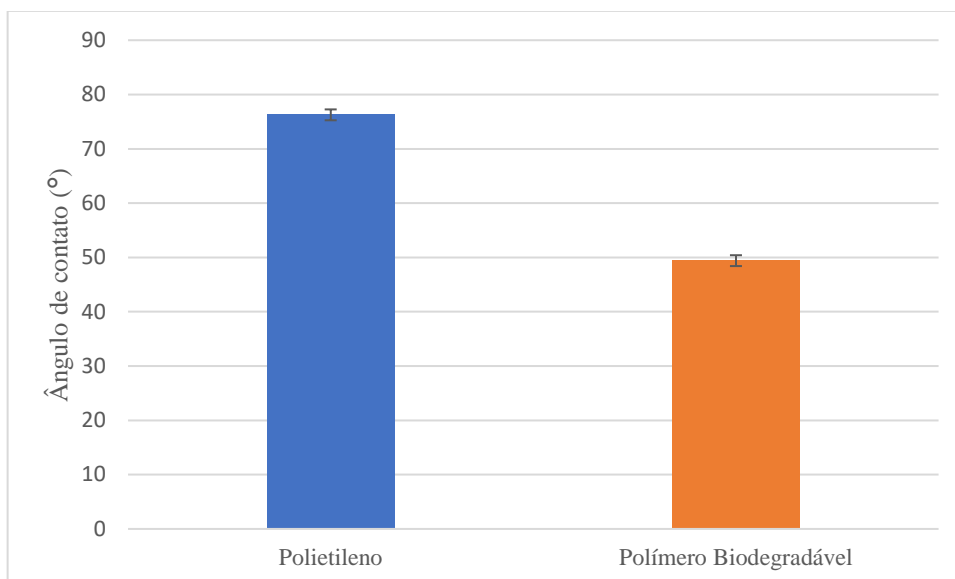


**Figura 33:** Montagem do ensaio de ângulo de contato.



A Figura 34 apresenta o resultado das medidas feitas nas gotas das superfícies dos filmes do material biodegradável e do polietileno; para o valor final foi feita uma média dos ângulos medidos em cada gota.

**Figura 34:** Ângulo de contato do material biodegradável e do polietileno

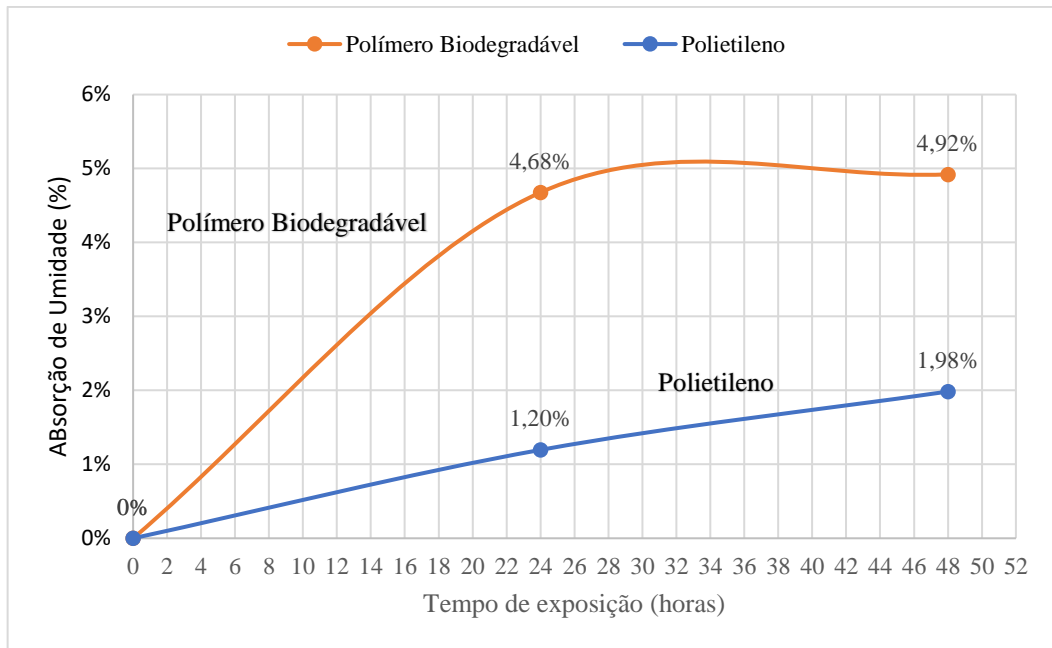


A partir das medidas realizadas é possível observar a afinidade do material biodegradável com a água. O resultado encontrado é coerente com a natureza hidrofílica do amido, devido à presença de átomos de oxigênio e hidrogênio, levando a um aumento da formação de ligações de hidrogênio (Martins, 2015). Embora o valor do ângulo de contato do polietileno não seja alto, é provável que essa amostra de filme seja reciclada, o que pode indicar que já tenha passado por um processo de degradação pela presença de grupos funcionais que fazem com que o ângulo seja menor que 90°. Mesmo não sendo um valor alto, o polietileno apresenta uma afinidade menor com a água que o polímero biodegradável, sendo mais hidrofóbico que o material biodegradável, o resultado vai ao encontro ao apresentado no ensaio de absorção de umidade e de água.

#### 5.2.4 Absorção de Umidade

Na Figura 35 encontra-se as curvas de absorção de umidade em função do tempo de exposição dos filmes do material biodegradável e do polietileno, que foram plotadas a partir das medidas de massa dos filmes e com esses dados foram calculadas as porcentagens de aumento de massa das amostras, indicando o quanto cada uma absorveu de umidade.

**Figura 35:** Absorção de umidade em função do tempo para o material biodegradável e para o polietileno

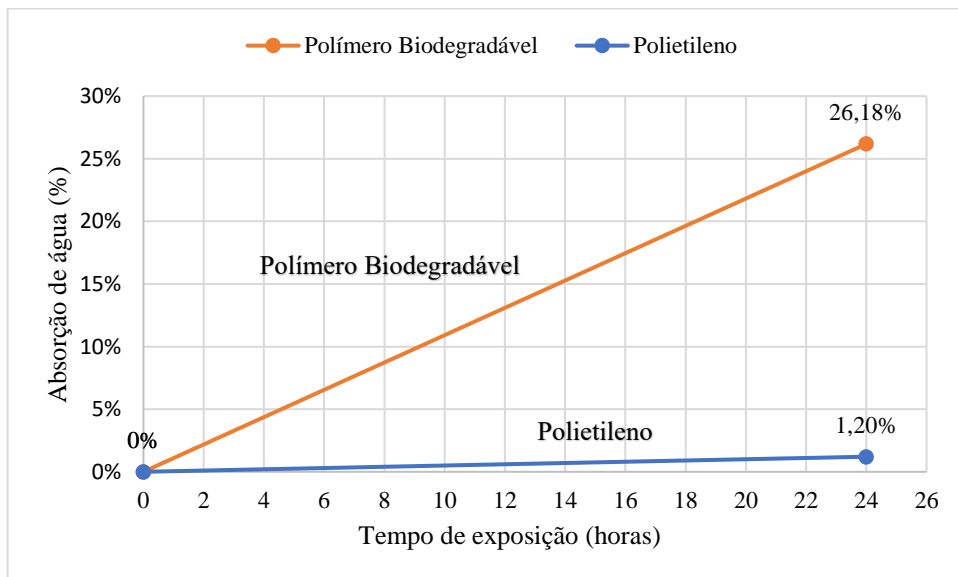


O material polimérico biodegradável apresenta um teor de absorção de umidade de quase 5%, sendo superior ao polietileno como era esperado. A hidrofilicidade do amido termoplástico faz com que a blenda com PBAT absorva água rapidamente e inche (Thiré, et al., 2004), sendo uma boa característica quando o objetivo é a degradação do material.

### 5.2.5 Absorção de água

O gráfico do aumento de massa em função do tempo de exposição das amostras está demonstrado na Figura 36.

**Figura 36:** Aumento de massa no ensaio de absorção de água (%) em função do tempo de exposição (dias)





O polietileno teve um aumento de massa de 1,20% enquanto o material biodegradável teve um aumento de 26,18% em média; esse resultado era esperado e vai de acordo com o obtido pelo ensaio de ângulo de contato devido ao teor de hidrofobicidade do material biodegradável, que se dá pela sua estrutura altamente ramificada (Thiré, et al., 2004).

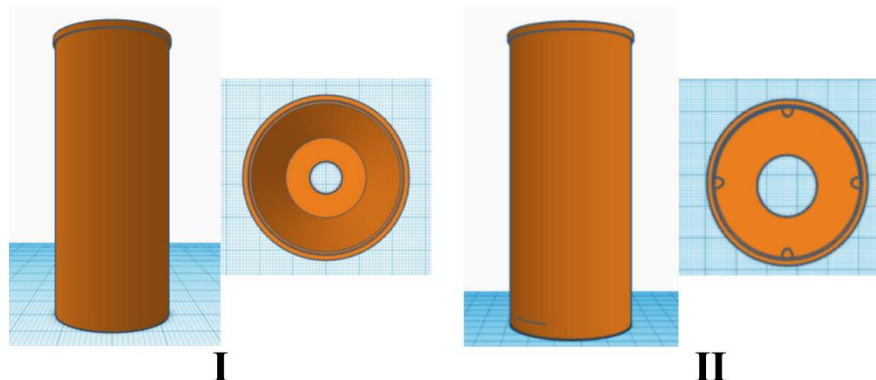
### 5.3 Crescimento de raízes

Para determinar preliminarmente o modelo de tubete que melhor desenvolveu as raízes e plantas das sementes de feijão, foram avaliados as características morfológicas de altura da parte aérea (H), diâmetro do colo (D), relação H/D, massa e altura do sistema radicular. Os tubetes desenhados para esse ensaio foram desenvolvidos de maneira a testar as características separadamente, mantendo o restante constante para fins de comparação. Todas as sementes foram germinadas por um período de vinte (20) dias e depois removidas dos tubetes para a medição e pesagem das variáveis morfológicas comparadas no ensaio. Após a comparação de todas as medidas foi definido o modelo de melhor resultado, sendo este o mais indicado.

#### 5.3.1 Influência de vincos internos

A existência das ranhuras internas nos tubetes comerciais tem como objetivo induzir o crescimento das raízes em direção ao fundo, prevenindo o enovelamento delas. (Severino, 2007) Os modelos I e II (Figura 37) foram desenvolvidos para comparar a influência da presença dos vincos na qualidade morfológica das mudas. Em ambos os modelos o desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular foram positivos e podem ser observados na Figura 38 e na Figura 39.

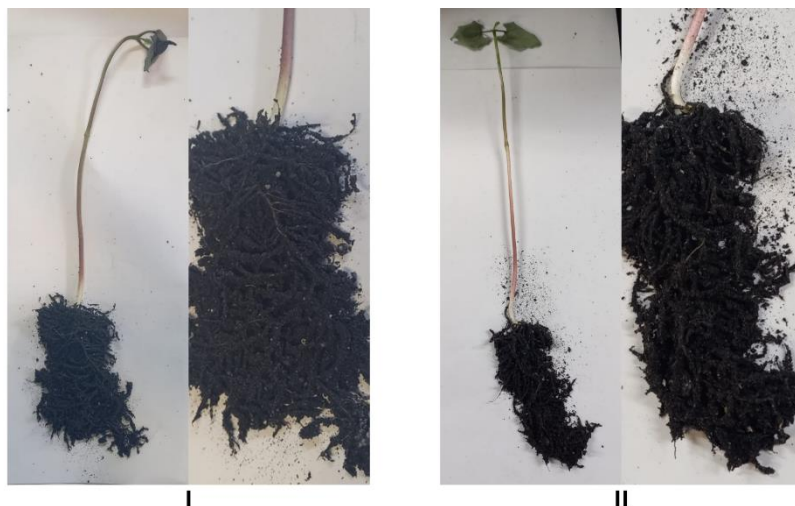
Figura 37: Modelos I e II



**Figura 38:** Desenvolvimento da parte aérea dos modelos I e II

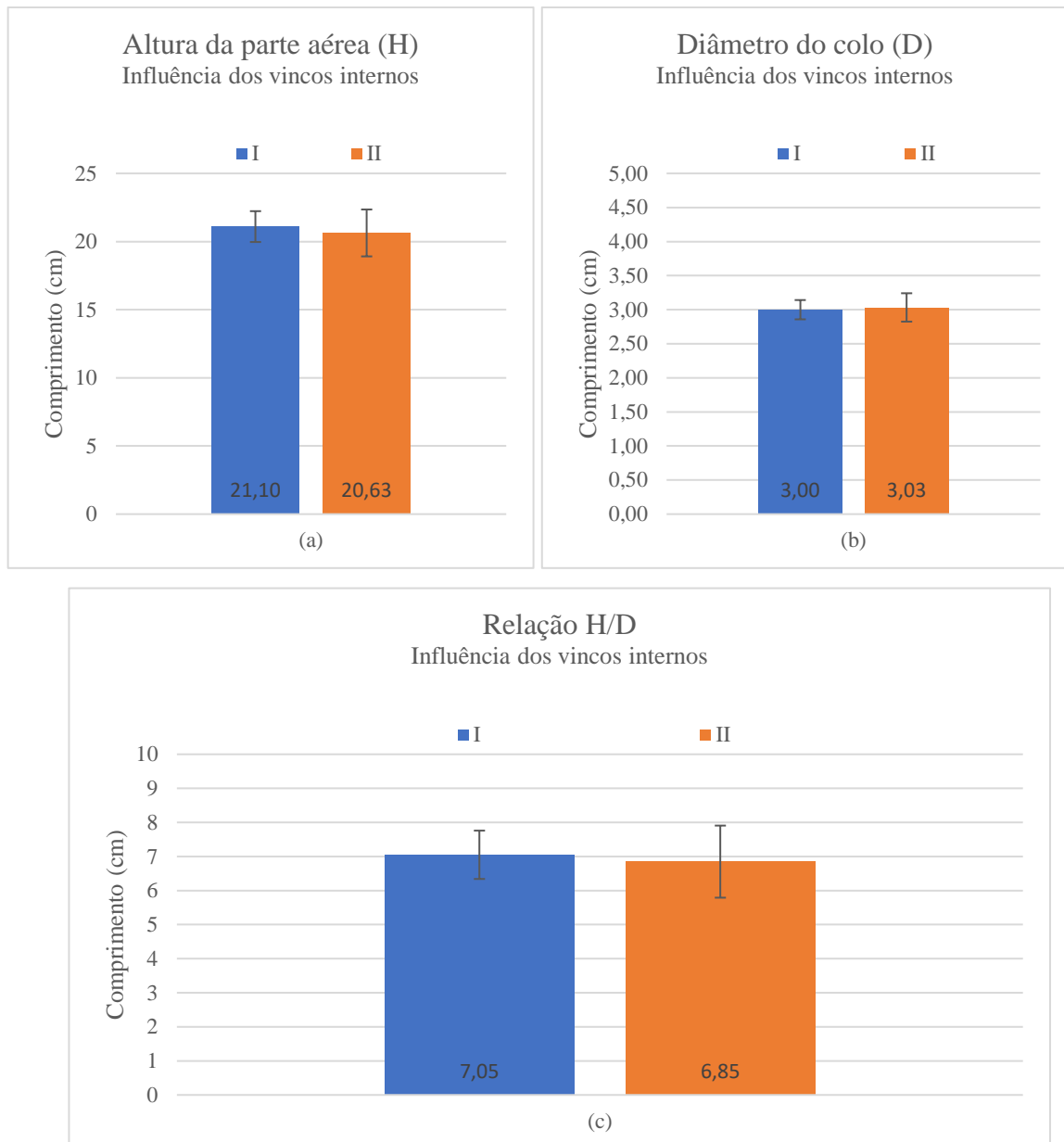


**Figura 39:** Sistema radicular dos modelos I e II



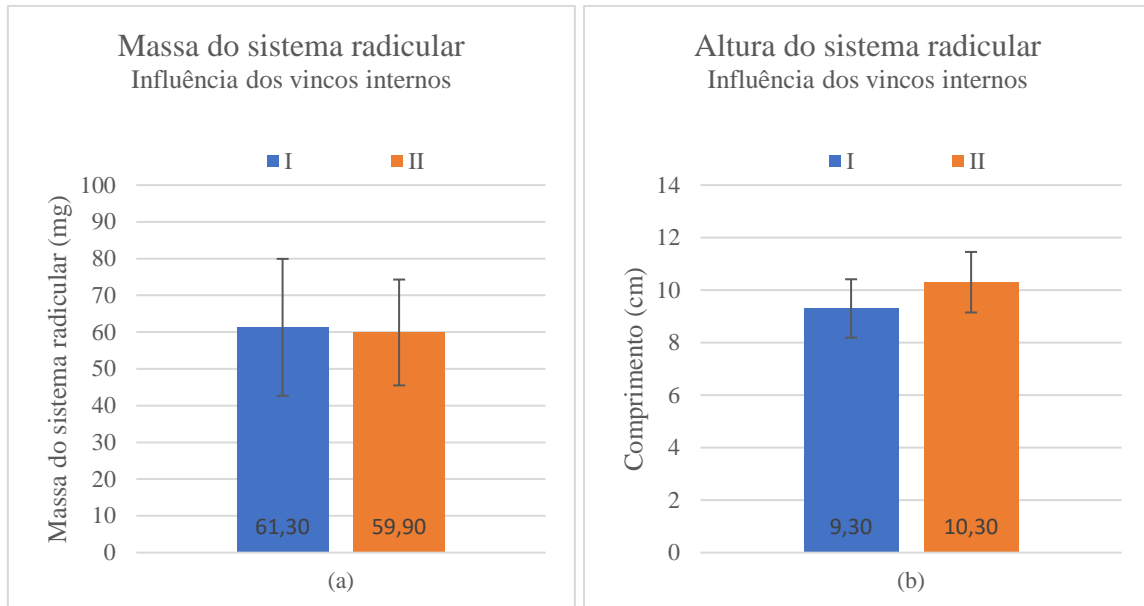
A comparação entre as medidas de altura da parte aérea (H), diâmetro do colo (D) e a relação entre H e D está demonstrada na Figura 40.

**Figura 40:** Comparação da altura da parte aérea (a), do diâmetro do colo (b) e a relação H/D (c) dos modelos I e II que comparam a existência dos vincos internos.



Analisando os dados coletados referentes à altura da parte aérea das plantas, do diâmetro do colo de cada, assim como da relação entre as duas medidas, não se observou diferenças estatísticas significativas entre os modelos. As comparações referentes ao crescimento do sistema radicular dos modelos estão nos gráficos da Figura 41.

**Figura 41:** Comparação da massa (a) e da altura do sistema radicular (b) dos modelos I e II que comparam a existência dos vincos internos.

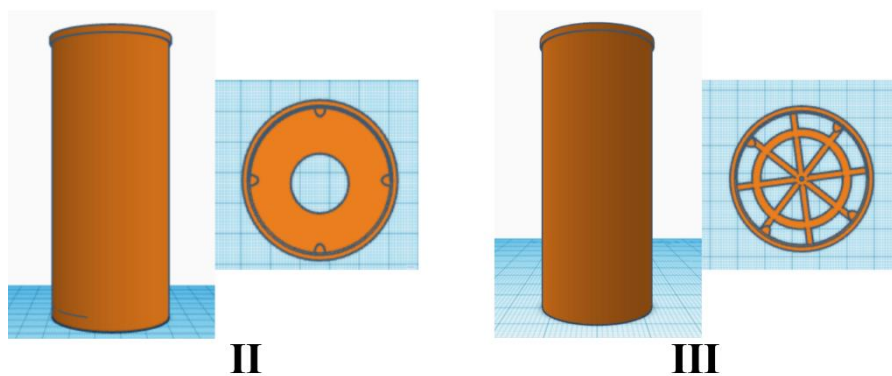


Os valores encontrados referentes à massa e comprimento do sistema radicular indicam um bom desenvolvimento das raízes nos dois modelos, apresentando um leve aumento no comprimento para o II (com vinco) indicando um índice de crescimento mais direcionado para o fundo do tubete. Nos dois modelos as raízes, tanto pivotante quanto as secundárias, apresentaram um bom desenvolvimento e a proximidade dos valores pode estar relacionada com o grande volume de substrato suportado pelos dois modelos, que proporciona uma maior disponibilidade de nutrientes e melhor aproveitamento de água internamente, sendo um fator relevante para o desenvolvimento.

### 5.3.2 Desenho da base do tubete

Dentre os modelos de tubetes de polietileno que são comerciais, foram utilizados dois deles como referência para a criação dos modelos II e III (Figura 42), que possuem o restante das características constantes, tendo apenas o desenho da base diferente. A parte aérea apresentou um bom desenvolvimento, assim como as raízes pivotante e secundárias, conforme é possível observar na Figura 43 e na Figura 44, respectivamente.

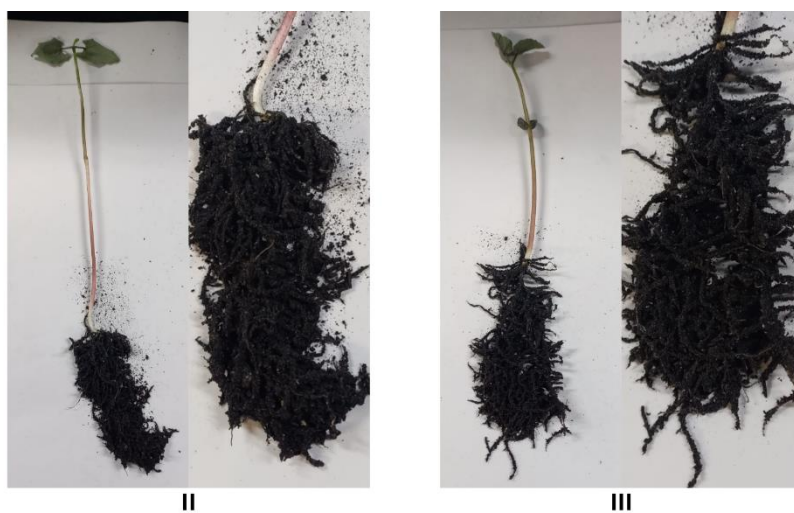
**Figura 42: Modelos II e III**



**Figura 43: Desenvolvimento da parte aérea dos modelos II e III**

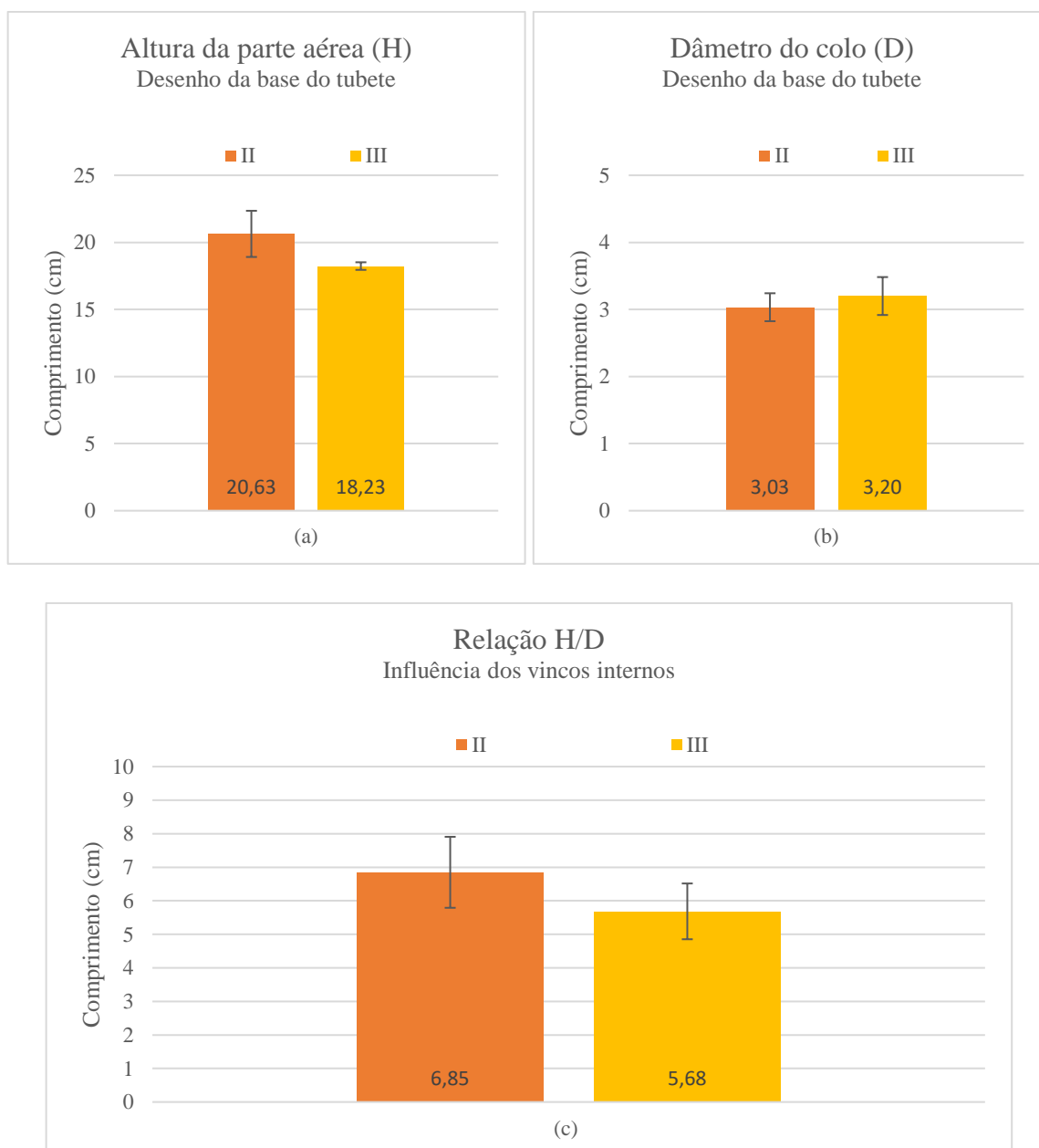


**Figura 44: Sistema radicular dos modelos II e III**



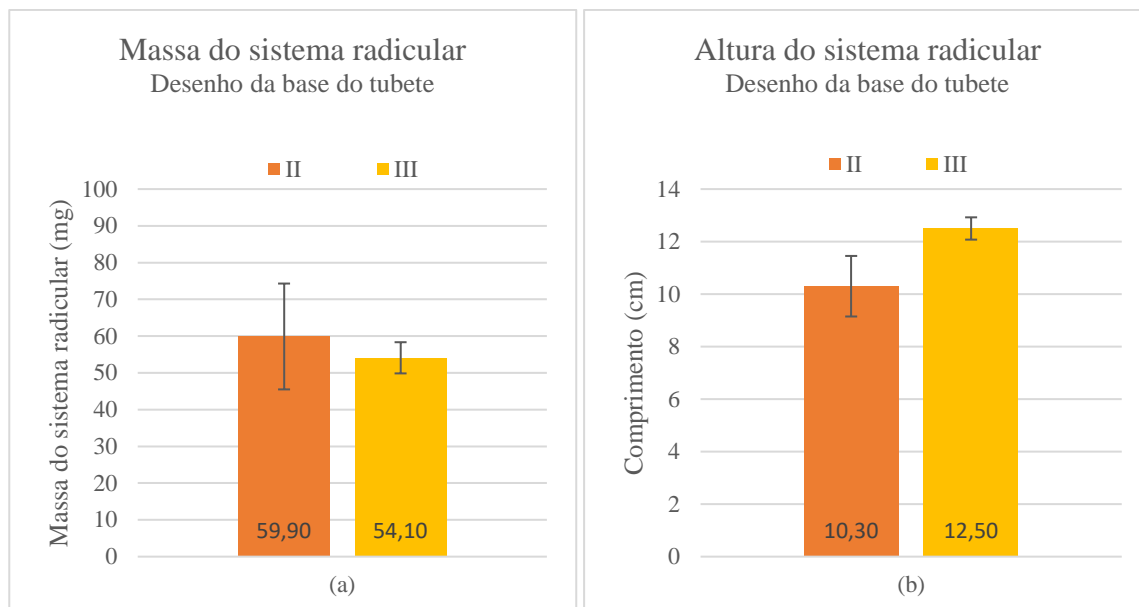
A comparação entre as medidas de altura da parte aérea (H), diâmetro do colo (D) e a relação entre H e D está demonstrada na Figura 45.

**Figura 45:** Comparação da altura da parte aérea (a), do diâmetro do colo (b) e a relação H/D (c) dos modelos II e III, que comparam o desenho da base do tubete.



O modelo II apresentou uma altura da parte aérea maior, enquanto o III apresentou o diâmetro do colo levemente maior, sendo assim a relação H/D ficou um pouco maior para o modelo II, sendo que não houve uma grande diferença estatística que permita se concluir sobre o desenho da base com relação a essas variáveis morfológicas. Os gráficos da Figura 46 comparam o crescimento do sistema radicular quanto à massa e altura.

**Figura 46:** Comparação da massa (a) e da altura do sistema radicular (b) dos modelos II e III, que comparam o desenho da base do tubete.



Quanto aos valores referentes ao sistema radicular, o modelo II teve uma medida da massa superior ao modelo III, enquanto a altura do sistema radicular do modelo III foi maior do que do II. Como nenhuma das alturas da raiz chegou ao valor da altura do tubete, não é possível concluir sobre influência da base dele na qualidade dessas variáveis morfológicas.

### 5.3.3 Presença de aberturas nas paredes

As aberturas nas paredes dos tubetes foram desenhadas com o objetivo de diminuir a massa dos modelos e aumentar a superfície de contato com o ambiente externo, facilitando assim a degradação do tubete quando compostado. Próximo à base foram feitas aberturas com o intuito de prevenir envelhecimento das raízes no fundo, a fim de que quando enterradas elas tenham espaço para direcionar seu crescimento, já nas paredes laterais o objetivo principal foi a diminuição da massa; os modelos III, IV e V estão retratados na Figura 47. Na Figura 48 e na Figura 49 é possível observar o crescimento da parte aérea e do sistema radicular de cada modelo, respectivamente.



Figura 47: Modelos III, IV e V

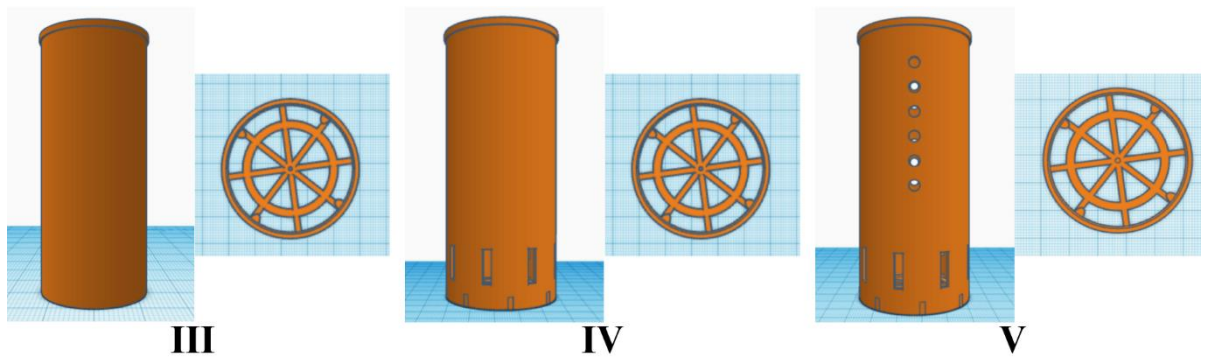


Figura 48: Desenvolvimento da parte aérea dos modelos III, IV e V

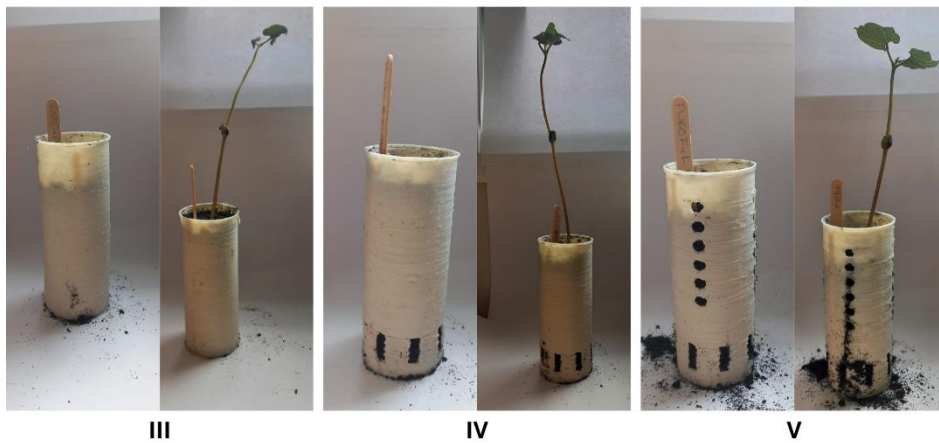


Figura 49: Sistema radicular dos modelos III, IV e V



As comparações entre as medidas de altura da parte aérea (H), diâmetro do colo (D) e a relação entre H e D estão demonstradas na Figura 50.



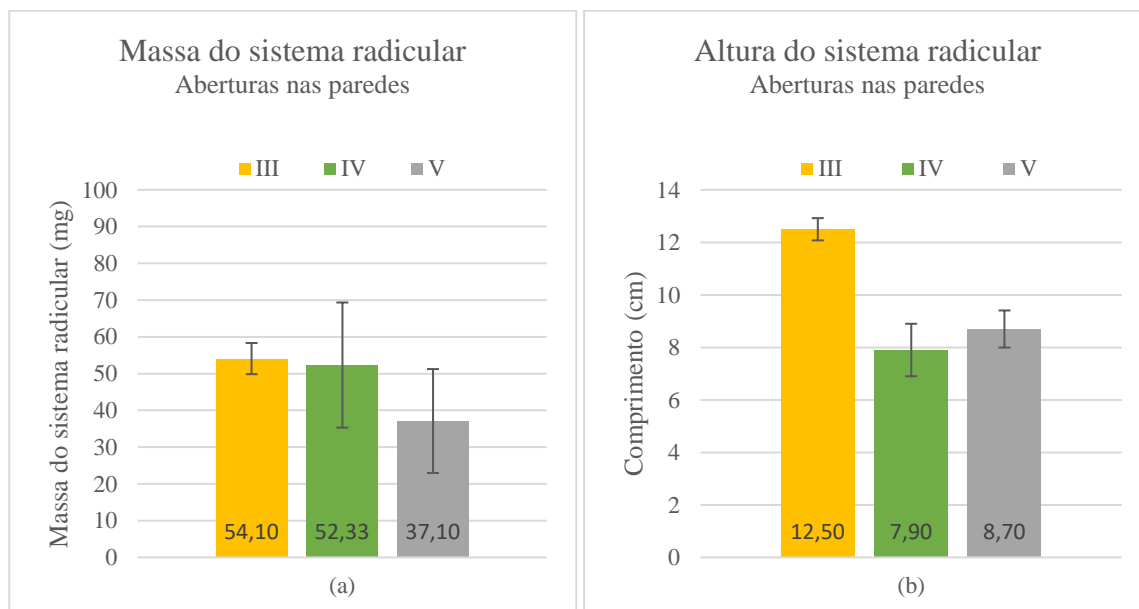
**Figura 50:** Comparação da altura da parte aérea (a), do diâmetro do colo (b) e a relação H/D (c) dos modelos III, IV e V, que comparam a influência das aberturas nas paredes



O tubete IV apresentou tanto a altura como o diâmetro do colo maiores que os demais, porém a relação H/D do tubete III foi maior. O tubete V, por apresentar aberturas na lateral do tubete em maior quantidade teve uma perda maior do substrato durante o período do teste. Como o volume do substrato é uma variável importante para a qualidade das mudas acabou apresentando valores menores.

Referente ao crescimento do sistema radicular de cada planta é possível observar a comparação entre os modelos na Figura 51.

**Figura 51:** Comparação da massa (a) e da altura do sistema radicular (b) dos modelos III, IV e V, que comparam a influência das aberturas nas paredes.

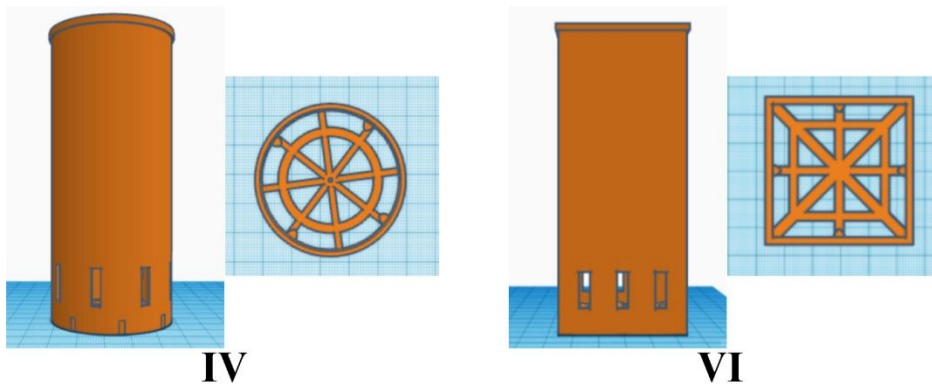


Segundo os valores referentes ao sistema radicular comparando as aberturas nas paredes dos tubetes, pode-se observar que os modelos III e IV tiveram medidas superiores em massa, porém a altura do modelo V superou o modelo IV. A altura superior do modelo III pode ser explicada por apresentar a menor perda de volume de substrato em comparação aos outros, que por possuírem as aberturas nas laterais acabaram tendo uma perda maior de volume, levando a um indício de que essa característica pode ser prejudicial na fase inicial da formação das mudas. Porém, como os resultados obtidos de altura da parte aérea e diâmetro do colo demonstram que o modelo IV tem medidas superiores, é possível que manter as aberturas apenas na parte mais próxima à base seja uma boa condição de crescimento para as mudas.

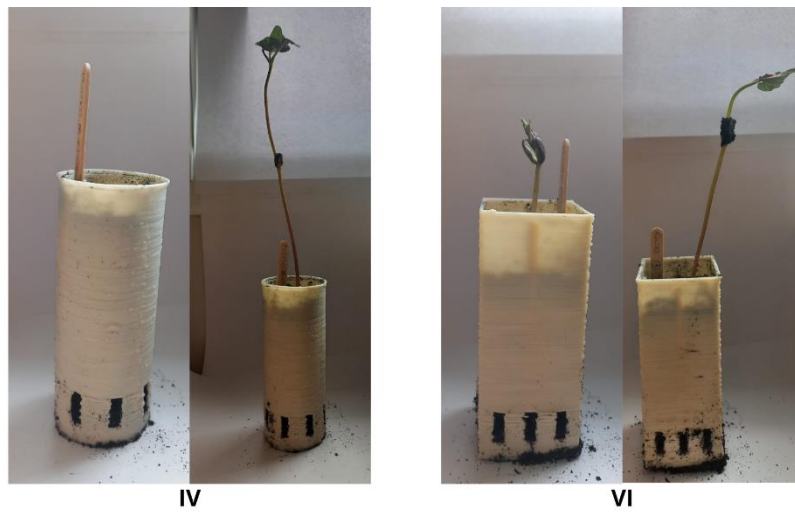
#### 5.3.4 Diferença de formato

Os formatos cilíndrico e paralelepípedo foram comparados nos modelos IV e VI (Figura 52), mantendo as demais características iguais como o desenho da base e as aberturas nas paredes próximas à base; tais características foram escolhidas para manter constantes baseadas nos tubetes já existentes desses formatos. Os dois existem no mercado, porém o tubete cilíndrico é o mais utilizado e vendido para mudas de café. É possível observar o crescimento da parte aérea e do sistema radicular de cada modelo na Figura 53 e na Figura 54, respectivamente.

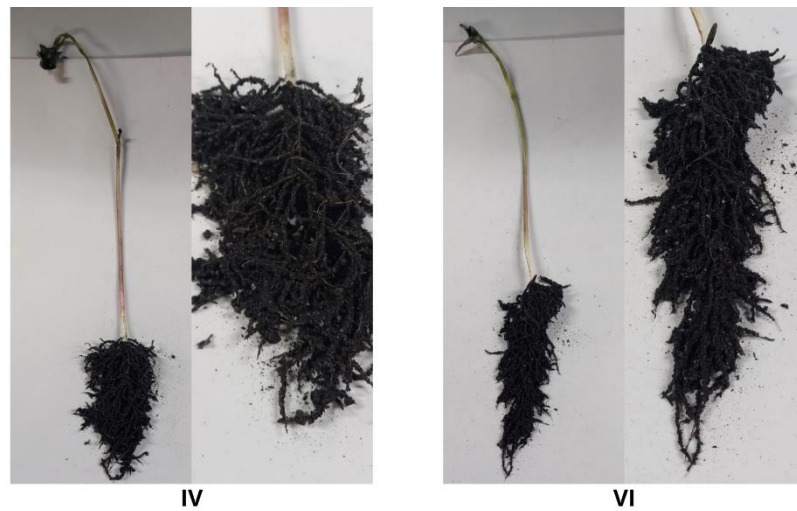
**Figura 52:** Modelos IV e VI



**Figura 53:** Desenvolvimento da parte aérea dos modelos IV e VI.



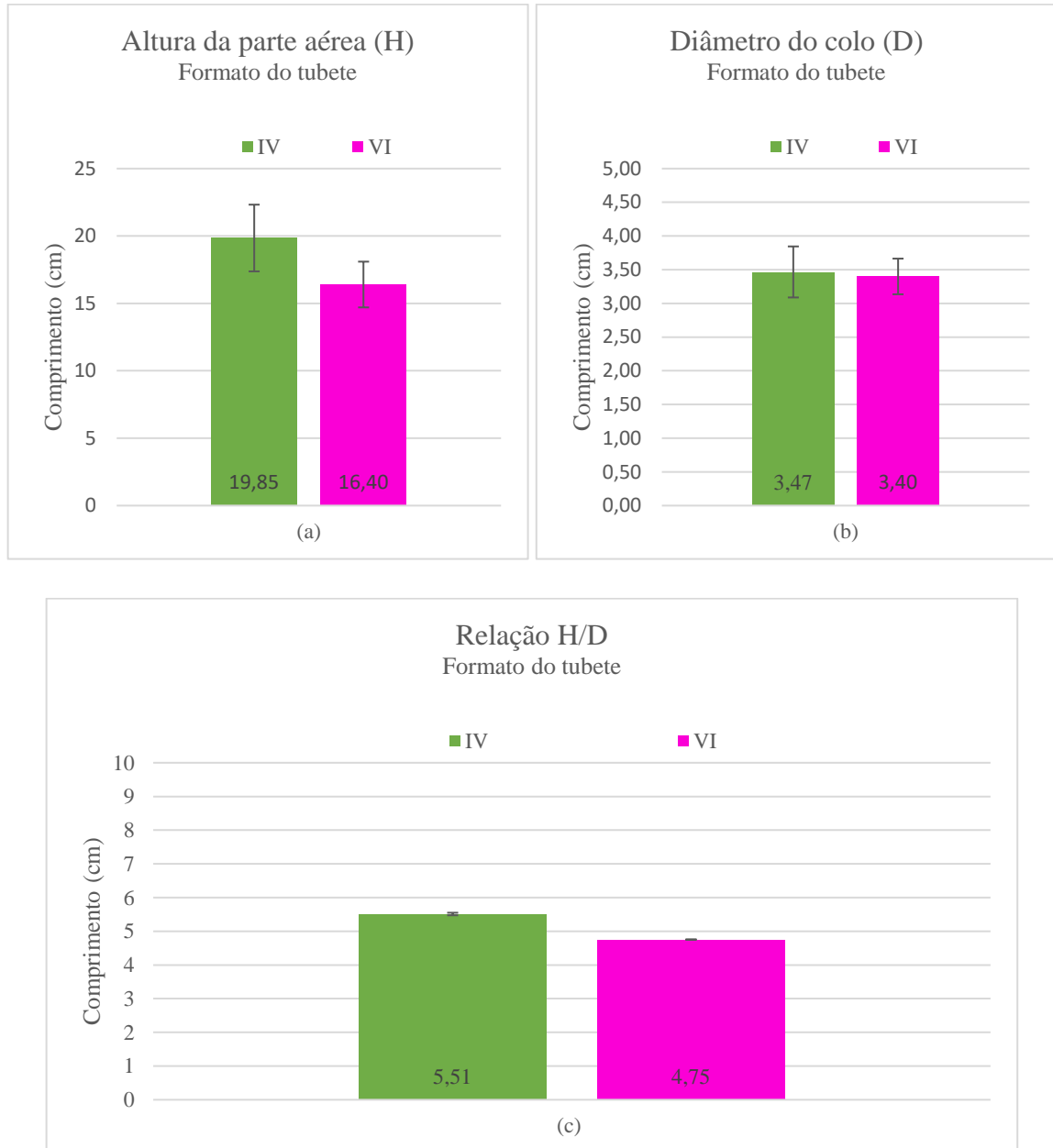
**Figura 54:** Sistema radicular dos modelos IV e VI



As medidas de altura da parte aérea (H), diâmetro do colo (D) e a relação entre H e D comparadas entre os formatos podem ser observadas na Figura 55; quanto ao crescimento do

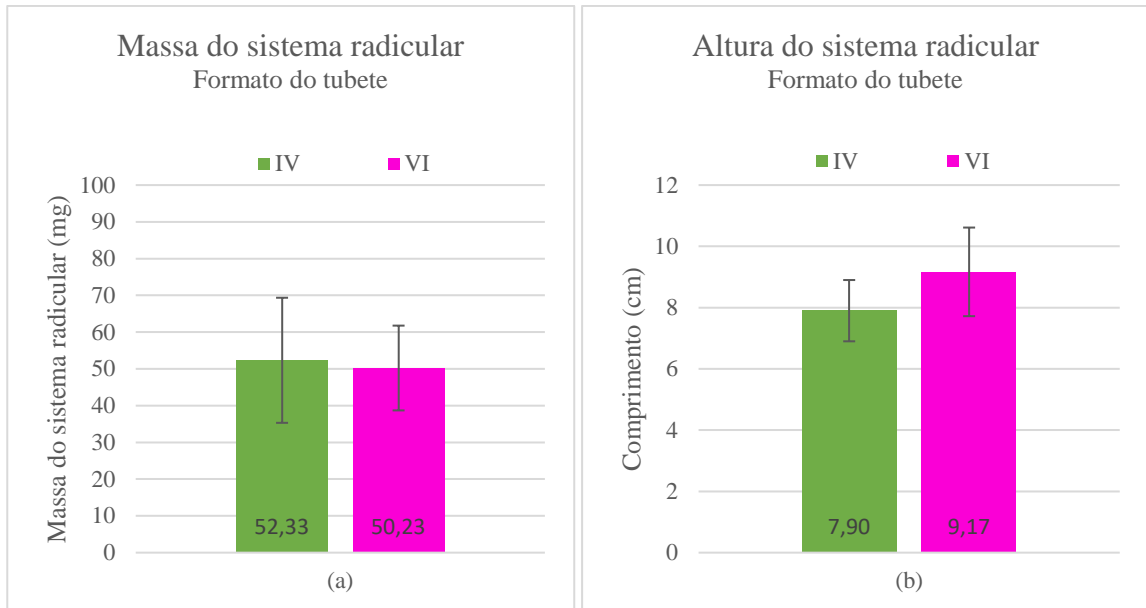
sistema radicular com as medidas de massa e altura os resultados estão demonstrados na Figura 56.

**Figura 55:** Comparação da altura da parte aérea (a), do diâmetro do colo (b) e a relação H/D (c) dos modelos IV e VI, que comparam os formatos dos tubetes



Observando as medidas da parte aérea, o tubete cilíndrico demonstrou valores maiores de altura e de diâmetro do colo, sendo o segundo fator com um aumento não tão significativo. Esse resultado indica uma superioridade, mesmo que pequena, do modelo IV a frente do modelo VI perante esses fatores morfológicos.

**Figura 56:** Comparação da massa (a) e da altura do sistema radicular (b) dos modelos IV e VI, que comparam os formatos dos tubetes

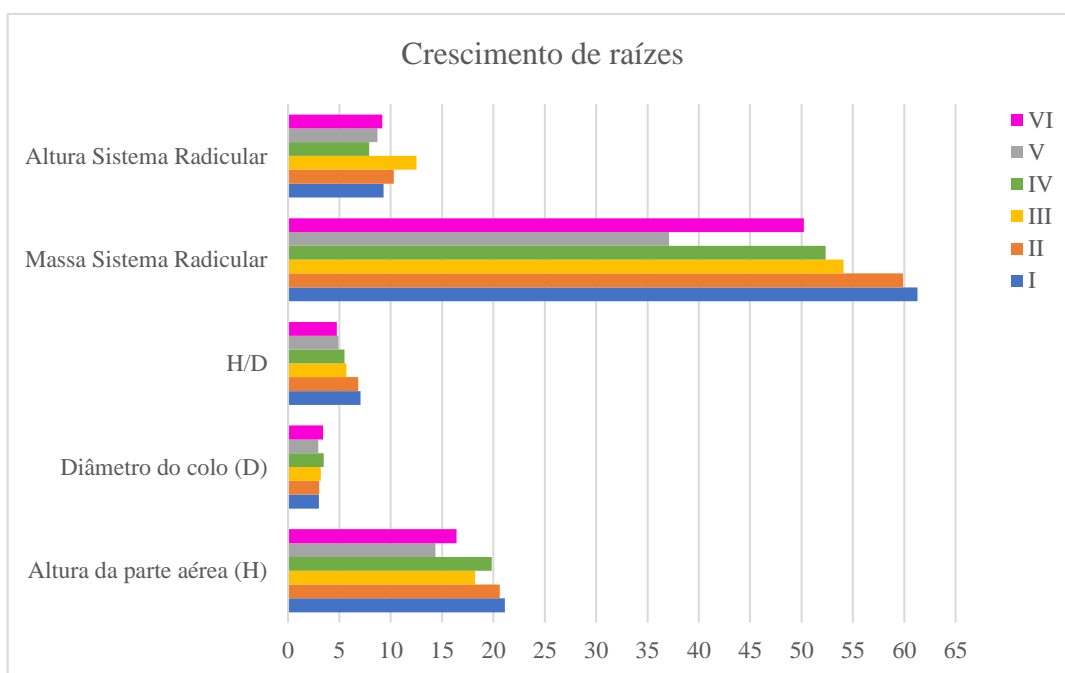


Na comparação referente ao desenvolvimento do sistema radicular houve uma inversão da superioridade das medidas de altura, sendo a raiz do tubete do modelo VI maior do que a do modelo IV. De modo geral, ambos os modelos apresentaram bom desenvolvimento na plantação das sementes de feijão, porém a maior capacidade volumétrica do formato paralelepípedo pode ter levado a uma altura maior da raiz, enquanto o formato cilíndrico levou a um crescimento de maior número de raízes secundárias e, conseqüentemente, a uma massa maior do sistema radicular. Estatisticamente não houve diferenças tão significativas nas medidas, sendo necessário um aprofundamento no teste para conclusões mais precisas.

### 5.3.5 Definição do modelo ideal


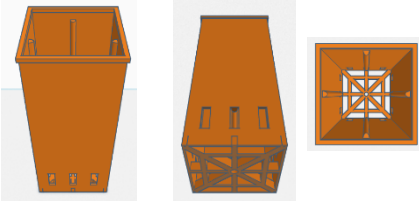
Para a definição do modelo ideal de tubete foram comparadas todas as medidas das variáveis morfológicas para as características que foram comparadas nesse ensaio. O gráfico na Figura 57 ilustra essa comparação.

**Figura 57:** Comparação de todas as variáveis morfológicas para todos os modelos de tubetes



A definição do modelo ideal foi orientada pelas características que demonstraram êxito no experimento de crescimento das raízes. Ao comparar as medidas das variáveis morfológicas, identificou-se que o tubete que incorpora as características mais promissoras deve apresentar vincos na parte interna das paredes, base com o desenho que possui diversas aberturas e aberturas na parte inferior das paredes apenas. Quanto ao formato, tanto cilíndrico quanto paralelepípedo são viáveis, pois ambos proporcionaram resultados satisfatórios. Conforme a Tabela 1, os modelos ideais que englobam todos esses parâmetros são os tubetes “b” (cilíndrico) e “e” (paralelepípedo), conforme detalhado na Tabela 7.

**Tabela 7:** Modelos considerados ideais para a plantação das mudas de café

Amostra	Formato	Base	Parede Externa	Modelo 3D
B	Cilindro	Diversas aberturas	Aberturas na base	
E	Paralelepípedo	Diversas aberturas	Aberturas na base	

## 6 CONCLUSÕES

O escopo desse trabalho visou a prototipagem via manufatura aditiva de novos modelos de tubetes destinados para o plantio de café utilizando um composto biodegradável de PBAT e amido termoplástico. Esta abordagem pode possibilitar o plantio direto da muda no solo, eliminando a necessidade de remoção do tubete, evitando assim essa etapa que pode causar estresse nas plantas e gerar possíveis perdas na produção. Considerando que as soluções mais utilizadas no mercado atualmente são as sacolas de polietileno devido ao grande volume de substrato que leva ao crescimento de mudas com qualidade e que os tubetes de polietileno rígido evitam o problema de enovelamento das raízes e podem ser reutilizados, os modelos desenvolvidos no trabalho tiveram como objetivo unir as propriedades mais favoráveis de ambos os produtos em um único tubete.

Os protótipos foram desenvolvidos via manufatura aditiva em uma impressora de extrusão direta por *pellets* e apresentaram flexibilidade aparente devido às características do material e a espessura das paredes ser menor que dos tubetes comerciais, medindo cerca de 2 mm. A capacidade volumétrica calculada para os tubetes desenvolvidos foi 235,5 ml para o formato cilíndrico e 300 ml para o formato paralelepípedo, valor que é superior à capacidade dos tubetes de polietileno rígido mais utilizados (120 ml) e inferior ao das sacolas de polietileno (700 ml).

Os modelos foram baseados nos tubetes que já existem, porém com mudanças que foram testadas quanto à influência no crescimento de sementes de feijão, que possuem o mesmo mecanismo de germinação que o café, a germinação epígea. Levando em consideração os resultados obtidos no ensaio de compostagem, em sessenta (60) dias os tubetes perderam 56% de massa em média. Considerando que a germinação do café leva cerca de sessenta (60) dias também, o resultado se mostrou promissor para a aplicação sugerida, que seria a plantação da muda de café sem remover o tubete. O teste de ecotoxicidade mostrou uma leve diminuição no crescimento das raízes das cebolas quando adicionado a peça do material biodegradável, porém não alterou o pH da água, podendo se concluir que não há indícios da liberação de substâncias tóxicas na degradação desse material.

O ensaio de ângulo de contato demonstra o comportamento hidrofílico do material biodegradável com valores de cerca de 50° e um espalhamento das gotas, devido à presença de amido que possui essa afinidade com a água, ao passo que o filme de polietileno teve medida de 76° em média, apresentando uma afinidade menor com água. Os resultados de absorção de

umidade e de água corroboram com o de ângulo de contato, pois em um período de quarente e oito (48) horas o material biodegradável teve aumento médio de massa de cerca de 5% para umidade e 26% para água, enquanto o polietileno teve aumento de massa médio de menos de 2% em ambos os ensaios.

Quanto à avaliação do crescimento das raízes relacionadas com as características desenhadas para os modelos de tubetes, foram avaliadas as variáveis morfológicas de altura da parte aérea, diâmetro do colo, relação entre os dois, massa e altura do sistema radicular. Sobre presença de vincos pode-se concluir que houve um indício de direcionamento do crescimento da raiz pela medida de altura do sistema radicular.

Referente ao desenho da base do tubete não foi possível concluir sobre sua influência perante as variáveis morfológicas que foram testadas, pois o crescimento do sistema radicular não chegou a atingir o valor da altura do tubete, ou seja, as raízes não encostaram na base para se testar sua interferência na qualidade. Com os resultados dos testes das aberturas nas paredes dos modelos, ponderando todas as variáveis medidas foi possível concluir que as aberturas apenas na parte mais próxima à base podem ser uma boa condição de crescimento para as mudas. A respeito do formato do tubete entre cilíndrico e paralelepípedo a conclusão foi de que o primeiro teve um número maior de raízes secundárias devido à maior massa do sistema radicular e o segundo teve uma altura maior da raiz que pode ser um indício da influência de uma capacidade volumétrica maior, porém os valores não tiveram diferença estatística tão significativa a ponto de se indicar a melhor solução, fazendo-se necessário aprofundamento dos testes para conclusões mais precisas.

O modelo ideal, determinado com base nas características eficazes no ensaio de crescimento das raízes, envolve um tubete com vincos internos, base desenhada com múltiplas aberturas e aberturas apenas na parte inferior das paredes. Os formatos cilíndrico e paralelepípedo são ambos apropriados, destacando-se os tubetes “b” e “e” que combinam todas essas características. Porém considerando os valores calculados para o tempo de exposição necessário para a degradação de até 90% dos tubetes, o modelo “e” (paralelepípedo) chegaria a essa taxa de degradação mais rapidamente, em cerca de 258 dias.

De maneira geral os tubetes desenvolvidos com o material biodegradável mostraram-se uma solução promissora para a aplicação no mercado cafeeiro; não há indícios da liberação de substâncias tóxicas, podendo a muda se desenvolver dentro do tubete pelo período de germinação e ser plantada sem a remoção do tubete, diretamente no solo, ocorrendo a sua



degradação enquanto a muda segue se desenvolvendo pelo período necessário. Devido ao fato do café ser uma cultura perene não é necessário replantar após a colheita, o tempo de degradação do tubete não seria um impeditivo para sua aplicação. O método de manufatura aditiva foi utilizado para realizar a prototipagem dos tubetes; no futuro, para uma aplicação em larga escala, os tubetes poderiam ser confeccionados via injeção para atender as demandas do mercado.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Avérous L.** Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch: A review [Diário] // Journal of Macromolecular Science-Polymer, [S. l.], v. C24. - 2004. - pp. 231-274.
- Azevedo Joyce B. et al.** Avaliação da Biodegradação em Compósitos com Fibras Naturais através de Perda de Massa e Produção de CO<sub>2</sub> [Diário]. - [s.l.] : Revista Virtual de Química, 2016. - Vols. V. 8, n. 4. - pp. 1115-1129.
- Bomfim Alexandre Alves et al** Avaliação morfológica de mudas de madeira-nova (*Pterogyne nitens* Tull.) produzidas em tubetes e sacos plásticos e de seu desempenho no campo [Diário] // Floresta, v. 39, n 1. - 2009.
- Buléon A. [et al.]** Mini review: Starch granules: structure and biosynthesis [Diário] // International Journal of Biological Macromolecules. - 1998. - pp. p. 85-112.
- Carvalho A.J.F de, Curvelo A.A.S e Agnelli. J.A.M** A first insight on composites of thermoplastic starch and kaolin [Diário] // Carbohydrate Polymers, Volume 15, Issue 2. - 2001. - pp. 189-194.
- Carvalho Jéssika** Desenvolvimento e Caracterização de Filmes Poliméricos Biodegradáveis para Aplicação em Sacolas Descartáveis e Sua Análise de Ecoeficiência [Relatório] : Dissertação / CENTRO DE ENGENHARIA, MODELAGEM E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS ; UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC – UFABC. - Santo André - SP : [s.n.], 2017.
- Cunha RL da et al.** Avaliação de substratos e tamanhos de recipientes na formação de mudas de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) em tubetes [Diário] // Ciência Agrotécnica, v. 26, n. 1. - [s.l.] : Ciência Agrotécnica, 2002. - 1 : Vol. 26. - pp. 7-12.
- D.S Rosa N.T Lotto, D.R Lopes, C.G.F Guedes,** The use of roughness for evaluating the biodegradation of poly- $\beta$ -(hydroxybutyrate) and poly- $\beta$ -(hydroxybutyrate-co- $\beta$ -valerate) [Diário]. - [s.l.] : Polymer Testing,, 2004. - Vol. 23. - pp. 3-8.
- De Oliveira Edson Gil** Vantajosas, mudas em tubetes não têm preferência do produtor [Diário] // Revista Visão Agrícola N°12. - 2013. - pp. 25-26.

- Fakhouri Farayde M., Daryne Costa Fábio Yamashita e Silvia M. Martelli Rodolfo C. Jesus, Katlen Alganer, Fernanda** Comparative study of processing methods for starch/gelatin film, [Diário]. - Carbohydrate Polymers : 681-689, 2013. - 2 : Vol. 95.
- Ferreira A. G. e Borghetti F** Germinação: do básico ao aplicado [Livro]. - Porto Alegre : Artmed, 323p., 2004.
- Fiskesjö G** The Allium test as a standard in environmental monitoring [Diário] // Hereditas, volume 102. - 1985. - pp. 99-112.
- Francesca Signori Maria-Beatrice Coltelli, Simona Bronco,** Thermal degradation of poly(lactic acid) (PLA) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) and their blends upon melt processing, [Diário] // Polymer Degradation and Stability, Volume 94, Issue 1. - 2009. - pp. 74-82.
- Jiao Jian Zeng Xiangbin, Huang Xianbo** An overview on synthesis, properties and applications of poly(butylene-adipate-co-terephthalate)–PBAT [Diário] // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, Volume 3, Issue 1. - 2020. - pp. 19-26.
- Kaseem M., Hamad K. e Deri F.** Thermoplastic starch blends: A review of recent works. [Diário] // Polym. Sci. Ser. A 54. - 2012. - pp. 165-176.
- Martinez Villadiego K., Arias Tapia, M.J., Useche, J. et al.** Thermoplastic Starch (TPS)/Polylactic Acid (PLA) Blending Methodologies: A Review [Diário] // Journal of Polymers and the Environment 30. - 2022. - pp. 75-91.
- Martins Andrea Bercini** EFEITO DE ÁCIDOS CARBOXÍLICOS EM BLENDDAS DE POLIPROPILENO E AMIDO TERMOPLÁSTICO [Relatório] : Dissertação de mestrado / Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais ; Universidade Federal do Rio Grande do Sul. - Porto Alegre : [s.n.], 2015.
- Melo Benjamim de** Estudos sobre produção de mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) em tubetes. [Relatório] : Tese de doutorado / Fitotecnia ; Universidade Federal de Lavras. - 1999. - p. 119.
- Miranda Vinícius R. e Carvalho Antonio J. F.** Blendas compatíveis de amido termoplástico e polietileno de baixa densidade compatibilizadas com ácido cítrico [Diário]. - [s.l.] : Polímeros [online], 2011. - n. 5 : Vol. v. 21.

- Morán J.I., Cyras V.P. e Vázquez A.** Preparation and Characterization of Three Different Derivatized Potato Starches [Diário]. - [s.l.] : J Polym Environ, 2013. - Vol. 21. - pp. 395-404.
- Pereira Pedro Carlos et al** Tamanho de Recipientes e Tipos de Substratos na Qualidade de Mudas de Tamarindeiro [Diário] // Revista Verde (Mossoró – RN – Brasil) v.5, n.3. - 2010. - pp. 136 - 142.
- Raven P.H., Evert R.F. e Eichhorn S.E** Biologia Vegetal. 6ª [Livro]. - Rio de Janeiro : Guanabara Koogan, 2001.
- Severino Liv Soares, et al.** Formação do sistema radicular de plantas de pinhão manso propagadas por mudas, estacas e sementes. [Diário]. - Campina Grande, Brasil] : Embrapa Algodão, 2007.
- Shaik Y.P., Schuster, J. and Shaik, A.** A Scientific Review on Various Pellet Extruders Used in 3D Printing FDM Processes [Diário] // Open Access Library Journal, 8. - 2012. - p. e7698.
- Shaik Y.P., Schuster, J. and Shaik, A.,** A Scientific Review on Various Pellet Extruders Used in 3D Printing FDM Processes [Diário] // Open Access Library Journal, 8. - 2021. - p. e7698.
- Silveira Paulilo Maria Terezinha, Viana Ana Maria e Randi Áurea.** Fisiologia Vegetal [Livro]. - Florianópolis : Biblioteca Universitária da Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- Thiré R. M. S. [et al.]** Redução da hidrofobicidade de filmes biodegradáveis à base de amido por meio de polimerização por plasma. [Diário] // Polímeros, 14(1). - 2004. - pp. 57-62.
- Tomaz M. A. et al** Produção de mudas e plantio [Seção do Livro] // Café arábica: do plantio à colheita / A. do livro SAKIYAMA N. S. et al.. - Viçosa : UFV, 2015.
- Tubaldini T. M.** Efeito de um formulado com liberação lenta de nutrientes na formação de mudas do cafeeiro em tubetes [Diário] // Uberlândia: UFU. - 1997. - p. 33p.
- U. Witt T. Einig, M. Yamamoto, I. Kleeberg, W. -D. Deckwe, R. J- Muller** Biodegradation of aliphatic–aromatic copolyesters: evaluation of the final biodegradability and

ecotoxicological impact of degradation intermediates, [Diário] // Chemosphere, Volume 44, Issue 2. - 2001. - pp. 289-299.

**Vallone H. S., Guimarães, R. J., Mendes, A. N. G., Souza, C. A. S., Cunha, R. L. da ., & Dias, F. P** Diferentes recipientes e substratos na produção de mudas de cafeeiros [Diário] // Ciência E Agrotecnologia, 34(1). - 2010. - pp. 55-60.

**Vroman Isabelle e Tighzert Lan.** Biodegradable polymers. [Diário]. - [s.l.] : Materials, 2009. - Vols. v. 2, n.2. - pp. 307-344.

**Xiaosong Zhai Wentao Wang, Hui Zhang, Yangyong Dai, Haizhou Dong, Hanxue Hou,** Effects of high starch content on the physicochemical properties of starch/PBAT nanocomposite films prepared by extrusion blowing [Diário] // Carbohydrate Polymers, Volume 239. - 2020. - p. Artigo 116231.