

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Engenharias
Curso de Engenharia Industrial Madeireira



Trabalho de Conclusão de Curso

**Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de três espécies florestais
após estabilização com resina de impregnação**

VAGNER RODRIGUES BAÚ

Pelotas, 2021

VAGNER RODRIGUES BAÚ

**Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de três espécies florestais
após estabilização com resina de impregnação**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Engenharia Industrial Madeireira da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Industrial Madeireira.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Beltrame

Pelotas, 2021

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

B111a Baú, Vagner Rodrigues

Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de três espécies florestais após estabilização com resina de impregnação / Vagner Rodrigues Baú ; Rafael Beltrame, orientador. — Pelotas, 2021.

53 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) — Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, 2021.

1. Madeira de reflorestamento. 2. Ésteres de metacrilato. 3. Compósito polímero madeira. 4. Impregnação. I. Beltrame, Rafael, orient. II. Título.

CDD : 674

Vagner Rodrigues Baú

Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de três espécies florestais após estabilização com resina de impregnação

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Industrial Madeireira, Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa:

Banca examinadora:

Prof. Dr. Rafael Beltrame (Orientador)

Doutor em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria.

Ms. Andrey Pereira Acosta (Banca 1)

Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Pelotas.

Dr. Ezequiel Gallio (Banca 2)

Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Pelotas.

**Dedico este trabalho à minha amada e
companheira esposa Nicolle e à minha sogra
Carmen**

**Aos meus pais, Cleunice e Arnaldo (in
memoriam).**

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por me proporcionar todas as oportunidades que fazem possível a realização de todos os meus objetivos nesta vida.

A minha amada esposa, Nicolle de Magalhães Monks Branco, por todo o carinho, amizade, amor e companheirismo dedicados a mim, sem sua ajuda e companhia está jornada seria impossível, muito obrigado, Te amo.

A minha sogra, Carmen Maria da Silva de Magalhães, por todo o auxílio, pensamentos positivos, assim como suas orações e conselhos que sempre me motivaram a seguir em frente com muita força e fé.

Aos meus pais, Cleunice Vieira Rodrigues e Arnaldo Carollo Baú (in memoriam), por sempre me incentivarem nos estudos, por mostrarem sempre o caminho certo a se seguir na vida e por todos os ensinamentos passados a mim.

Aos meus colegas de graduação, Wândria dos Santos Ribeiro, Karine de Almeida e Heronaldo Pereira de Souza (Hiran), por toda ajuda, apoio e conselhos neste período.

A Universidade Federal de Pelotas, ao Curso de Engenharia Industrial Madeireira, por todo acolhimento. Aos professores do curso, por todo ensinamento passado, sendo fundamentais para minha formação.

A minha família, pelo carinho e incentivo durante essa jornada, e que de alguma forma contribuíram para minha formação.

Ao meu orientador, Rafael Beltrame, por ter aceitado me ajudar nessa idéia, pelo apoio, conselhos e orientações durante a realização deste trabalho.

A empresa Colméia Resinas, pela doação da resina de impregnação para realização do meu trabalho, sem vocês não seria possível realizá-lo.

Ao técnico, Ricardo Ripoll, por toda a ajuda durante a execução da prática e utilização dos maquinários, e aos demais colegas e professores, que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma para realização deste trabalho e na minha formação.

***“O homem que remove montanhas sempre começa
retirando pequenas pedras do caminho.”
(Provérbio chinês)***

RESUMO

BAÚ, Vagner Rodrigues. **Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de três espécies florestais após estabilização com resina de impregnação.** 2021. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Madeireira) Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

Com a exploração inadequada das florestas nativas, cada vez mais as madeiras com excelente qualidade estão ficando escassas. Desta forma, uma alternativa tem sido o uso de madeiras de reflorestamento com rápido crescimento como o *Eucalyptus* e *Pinus*, porém muitas destas espécies não apresentam propriedades físicas e mecânicas adequadas para determinadas utilizações. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo determinar propriedades físicas e mecânicas das madeiras de *Araucaria angustifolia*, *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após a impregnação com resina a base de ésteres de metacrilato a fim de demonstrar a viabilidade de se obterem compósitos polímero madeira (WPC) que podem apresentar comportamento equivalente ou superior ao da madeira sem tratamento. Para tal, foram confeccionados 46 corpos de prova para cada espécie, onde foi utilizado o método de vácuo-pressão para a impregnação da resina, utilizando um vácuo inicial e após uma pressão de 8 Kgf/cm², pelo período de 4 horas, para posteriormente realizar a polimerização da resina no interior da madeira com temperaturas de 60, 80, e 90°C em ciclos de 1 hora cada. Em geral, os resultados obtidos para flexão dinâmica se mostraram inferiores quando comparados com as madeiras sem tratamento. Para o teste de dureza janka houve melhora nas propriedades resultando em um aumento médio de 194% nas espécies de coníferas. Para a massa específica foi possível observar diferença nos resultados, onde as madeiras de pinus e araucária aumentaram significativamente sua densidade, o que não aconteceu para a propriedade de retratibilidade em que não se obteve resultados positivos, já que os corpos de prova após a impregnação não reduziram os índices de contração e inchamento das madeiras. Quanto ao ganho de massa, nas coníferas os resultados chegaram a um aumento médio de 77,8%, sendo que para o *Eucalyptus grandis* foi de apenas 14% em decorrência de sua baixa permeabilidade, resultando em um aumento somente no ensaio de flexão estática. A análise dos dados permitiu perceber que as madeiras após a impregnação tendem a melhorar suas propriedades mecânicas e nas propriedades físicas apenas a retratibilidade não obteve resultados favoráveis.

Palavras-chave: madeira de reflorestamento. compósito polímero madeira. impregnação. ésteres de metacrilato.

ABSTRACT

BAÚ, Vagner Rodrigues. **Evaluation of physical and mechanical properties of three forest species after stabilization with impregnation resin.** 2021. 53 f. Course Conclusion Paper (Industrial Timber Engineering) Engineering Center, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2021.

With the inadequate exploitation of native forests, wood with excellent quality is becoming increasingly scarce. Thus, an alternative has been the use of fast-growing reforestation woods such as Eucalyptus and Pinus, but many of these species do not have physical and mechanical properties suitable for certain uses. In this context, this work aims to determine physical and mechanical properties of wood from Araucaria angustifolia, Pinus elliottii and Eucalyptus grandis after impregnation with resin based on methacrylate esters in order to demonstrate the feasibility of obtaining wood polymer composites (WPC).) which can present behavior equivalent or superior to that of untreated wood. To this end, 46 specimens were made for each species, using the vacuum-pressure method for resin impregnation, using an initial vacuum and after a pressure of 8 Kgf/cm², for a period of 4 hours, for later perform resin polymerization inside the wood at temperatures of 60, 80, and 90°C in cycles of 1 hour each. In general, the results obtained for dynamic bending were inferior when compared to untreated wood. For the janka hardness test there was an improvement in properties resulting in an average increase of 194% in coniferous species. For the specific mass, it was possible to observe a difference in the results, where the pine and araucaria woods significantly increased their density, which did not happen for the shrinkage property in which positive results were not obtained, since the specimens after impregnation did not reduced the contraction and swelling rates of the woods. As for the mass gain, in conifers the results reached an average increase of 77.8%, and for Eucalyptus grandis it was only 14% due to its low permeability, resulting in an increase only in the static bending test. Data analysis showed that woods after impregnation tend to improve their mechanical properties and in physical properties only shrinkage did not obtain favorable results.

Keywords: reforestation wood. composite wood polymer. impregnation. methacrylate esters.

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Madeiras de <i>Pinus elliottii</i> (A), <i>Eucalyptus grandis</i> (B) e <i>Araucaria angustifolia</i> (C). | 17 |
| Figura 2 - Planos de observação das propriedades da madeira. | 18 |
| Figura 3 - Métodos de impregnação (A) imersão; (B) vácuo-pressão. | 19 |
| Figura 4 - Tratamento de postes por autoclave. | 21 |
| Figura 5 - Tábuas armazenadas no campus do curso (A) pinus e eucalipto; (B) araucária. | 22 |
| Figura 6 - Local onde foram retirados os corpos-de-prova. | 22 |
| Figura 7 - Amostras para avaliação de propriedades físicas e mecânicas. | 23 |
| Figura 8 - Amostras para os ensaios de: (A) flexão estática e dinâmica; (B) compressão paralela; (C) retratibilidade; (D) dureza janka. | 24 |
| Figura 9 - Resina de impregnação Colméia Resinas (A) e Equipamento de tratamento autoclave (B). | 25 |
| Figura 10 - Amostra após tratamento em autoclave. | 25 |
| Figura 11 - Secagem em estufa das amostras impregnadas para retratibilidade. | 26 |
| Figura 12 - Secagem em estufa das amostras para teor de umidade. | 27 |
| Figura 13 - Etapas de saturação (A) e secagem (B) das amostras impregnadas. | 28 |
| Figura 14 - Ensaio de Dureza janka no plano radial (A) pinus; (B) araucária; (C) eucalipto. | 30 |
| Figura 15 - Ensaio de flexão estática (A) pinus; (B) araucária; (C) eucalipto. | 31 |
| Figura 16 - Ensaio de flexão dinâmica. | 32 |
| Figura 17 - Ensaio de compressão paralela (A) pinus; (B) araucária; (C) eucalipto. | 33 |
| Figura 18 - Grau de impregnação da resina (A) <i>Pinus elliottii</i> , (B) <i>Araucaria angustifolia</i> ; (C) <i>Eucalyptus grandis</i> | 36 |
| Figura 19 - Imagem anatômica das madeiras de <i>Pinus elliottii</i> (A), <i>Eucalyptus grandis</i> (B) e <i>Araucaria angustifolia</i> (C). | 37 |
| Figura 20 - Resina dissolvida após processo de saturação das amostras. | 40 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Dimensões das amostras para avaliação das propriedades da madeira. | 24 |
| Tabela 2 - Valores médios de teor de umidade bem como massa específica antes e após impregnação..... | 34 |
| Tabela 3 - Valores médios para percentual de ganho de massa das amostras. | 36 |
| Tabela 4 - Valores médios do diâmetro em micrometros para traqueídeos, vasos e raios das madeiras..... | 37 |
| Tabela 5 - Valores médios para contração e inchamento dimensional e volumétrico, e respectivos coeficientes de anisotropia, após a impregnação..... | 39 |
| Tabela 6 - Valores médios para o ensaio de flexão estática, das madeiras impregnadas..... | 42 |
| Tabela 7 - Valores médios para o ensaio de flexão dinâmica, após impregnação.... | 43 |
| Tabela 8 - Valores médios para massa específica e força nos panos radial e tangencial..... | 44 |
| Tabela 9 - Valores médios para o ensaio de compressão paralela..... | 45 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | Introdução | 13 |
| 2 | Objetivo Geral | 15 |
| 2.1 | Objetivos específicos | 15 |
| 3 | Revisão de Literatura | 16 |
| 3.1 | Espécies florestais | 16 |
| 3.2 | Madeira e suas propriedades | 17 |
| 3.3 | Tratamento da madeira (impregnação) | 19 |
| 3.4 | Tratamento por vácuo-pressão (autoclave) | 20 |
| 3.5 | Polimerização (cura da resina) | 21 |
| 4 | Metodologia | 22 |
| 4.1 | Matéria-prima | 22 |
| 4.2 | Preparação das amostras | 23 |
| 4.3 | Impregnação | 23 |
| 4.4 | Propriedades físicas | 26 |
| 4.4.1 | Teor de umidade | 26 |
| 4.4.2 | Massa específica | 27 |
| 4.4.3 | Ganho de massa | 27 |
| 4.4.4 | Retratibilidade | 28 |
| 4.5 | Propriedades mecânicas | 30 |
| 4.5.1 | Dureza Janka | 30 |
| 4.5.2 | Flexão Estática | 30 |
| 4.5.3 | Flexão Dinâmica | 31 |
| 4.5.4 | Compressão paralela | 32 |
| 5 | Resultados e Discussão | 34 |
| 5.1 | Teor de umidade e massa específica | 34 |
| 5.2 | Ganho de massa | 35 |
| 5.3 | Retratibilidade | 38 |
| 5.4 | Flexão estática | 41 |
| 5.5 | Flexão dinâmica | 42 |
| 5.6 | Dureza janka | 44 |
| 5.7 | Compressão paralela | 45 |
| 6 | Considerações Finais | 47 |
| 7 | Referências | 48 |

1 Introdução

Utilizada para diversas finalidades a madeira é um material muito conhecido, porém com diversas peculiaridades referentes ao seu uso por se tratar de um material anisotrópico, higroscópico e heterogêneo. Devido a sua demanda estar cada vez maior, tem-se utilizado espécies de rápido e médio crescimento (VIDAURRE et al., 2018), tais como o pinus e o eucalipto. Porém, o rápido crescimento das espécies exóticas plantadas no sul do Brasil atinge dimensões comerciais ainda muito jovens, sendo assim esta árvore terá uma maior quantidade de lenho juvenil e primaveril, que tendem a possuir baixa densidade e como principais consequências destacam-se a elevada instabilidade dimensional, principalmente no sentido axial, e a baixa resistência à compressão e flexão, o que acaba limitando o uso dessas madeiras (LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2000).

Visando melhorar as propriedades da madeira, Liibert et al. (2011) descrevem que tratamentos com impregnação a vácuo, aquecimento, pintura e revestimento de superfície à base de óleo ou formulações baseadas em compostos orgânicos voláteis, visam sempre melhorar estes processos.

Como a madeira é um material natural e orgânico, pode ser degradada por diversos agentes biológicos, como os fungos, bactérias ou alguns tipos de insetos, principalmente madeiras de baixa densidade e muito porosas.

Um dos grandes problemas da madeira ocorre devido sua variação volumétrica, que é a perda ou o ganho de umidade, onde sua variação dimensional ocorre de forma desigual conforme o plano analisado, causando deformações como rachaduras, empenamentos e diversos outros defeitos que podem gerar preconceitos e restrições no uso deste material. Assim, a impregnação com resinas é um diferencial que está sendo mais explorado e estudado, pois este método pode proporcionar uma estabilidade maior para a madeira.

Segundo Meyer (1982) com o avanço dos polímeros sintéticos e a facilidade de utilização, juntamente com a aplicação da radiação e temperatura para a polimerização, durante o período de 1930 a 1960, várias formas de se estabilizar a madeira foram criadas.

De acordo com Schneider & Witt (2004), a impregnação pode ser realizada por qualquer componente líquido que possa ser endurecido termicamente utilizando iniciadores químicos de decomposição térmica. Com esse tratamento, obtém-se um

aumento considerável nas propriedades mecânicas e na estabilidade dimensional da madeira, além da redução na troca de umidade com o meio ambiente e maior dificuldade de ataque de agentes degradadores, quando comparado com a madeira não impregnada (MANRICH, 1984).

Até o presente momento, uma das vantagens da utilização de resinas na impregnação de madeira é a compatibilidade dessas resinas com adesivos (BULIAN et al., 2009), já que na maioria dos casos a madeira passará por um processo de colagem, como por exemplo a colagem de cabos na cutelaria.

Um fator crucial que deve ser levado em consideração na escolha da resina é a viscosidade utilizada no processo de impregnação, a fim de se reduzir o consumo de energia gasta durante a etapa de aplicação do vácuo, otimizando este processo.

Diante disto, torna-se importante a determinação de propriedades físicas e mecânicas das madeiras após impregnação com resina, já que pode definir novos usos para madeiras que possuem baixas densidades e resistência mecânica.

2 Objetivo Geral

Avaliar propriedades físicas e mecânicas das madeiras de *Araucaria angustifolia*, *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após a impregnação com resina comercial a fim de demonstrar a viabilidade de se obterem compósitos polímero madeira com comportamento equivalente ou superior ao da madeira sem tratamento.

2.1 Objetivos específicos

- Determinar propriedades físicas, como densidade e retratibilidade (contração e inchamento), das espécies de madeira depois da impregnação e teor de umidade para as amostras antes da impregnação;
- Analisar propriedades mecânicas das espécies após a impregnação com resina;
- Comparar os resultados das madeiras impregnadas com as madeiras sem tratamento e com base na literatura.

3 Revisão de Literatura

3.1 Espécies florestais

O gênero *Pinus* possui 1,8 milhão de hectares de florestas plantadas no Brasil (IBGE, 2020). Dentre as espécies mais cultivadas destaca-se o *Pinus elliottii*, por ser uma árvore que gera madeira de boa qualidade quando empregada para determinadas finalidades, como a produção de madeira roliça na utilização em postes e mourões ou madeira serrada na fabricação de móveis, chapas e placas (CADEMARTORI et al., 2012). É uma espécie de madeira leve com densidade de aproximadamente 0,446 g/cm³, de baixa durabilidade natural, quando não tratada, além de ser de fácil secagem e impregnação (AGROSOFT, 2000; MENDES et al., 2004). De acordo com Shimizu (2005) a espécie de *Pinus elliottii* é uma árvore de cor branco-amarelado que contém cerne e alburno indistinto pela cor, macia ao corte e características distintas devido apresentar resina em sua anatomia (Figura 1A).

A espécie de *Eucalyptus* tem grande potencial para processamento mecânico da madeira, por se tratar de uma árvore de rápido crescimento, e em alguns casos ter boa adaptação às condições climáticas encontradas no Brasil, além de apresentar propriedades físicas e mecânicas consideravelmente boas (LIMA; GARCIA, 2010). Em média a massa específica do *Eucalyptus grandis* varia entre 0,446 g/cm³ a 0,538 g/cm³, além de possuir baixo custo de obtenção e manejo (CARVALHO; CAMARGO, 1996).

Segundo o IPT (2021) a madeira de *Eucalyptus grandis* possui cerne e alburno distintos pela cor, onde o cerne possui cor castanho-rosado-claro e o alburno bege-rosado (Figura 1B). Quanto à tratabilidade dessa espécie de madeira, o cerne é difícil de ser tratado, entretanto, o alburno é permeável (SILVA et al., 2010).

Segundo Hillig et al. (2012) a *Araucaria angustifolia* durante um longo período foi a principal matéria-prima madeireira de grande importância econômica no sul do país, possui madeira leve, com massa específica variando de 0,371 g/cm³ a 0,521 g/cm³, tendo pouca durabilidade quando exposta diretamente as intempéries. Apresenta boas características físicas e mecânicas e é indicada para construções em geral, móveis, ripas, tabuas para forro, dentre outras utilidades (LORENZI, 1992).



Figura 1 - Madeiras de *Pinus elliottii* (A), *Eucalyptus grandis* (B) e *Araucaria angustifolia* (C).
Fonte: ESCORAS, 2021; BRAGA, 2021.

3.2 Madeira e suas propriedades

A madeira é um material heterogêneo e orgânico que apresenta propriedades físicas, mecânicas e anatômicas que podem variar entre espécies ou até mesmo na própria árvore (PALERMO et al., 2013). A mesma pode ter sua durabilidade natural e propriedades reduzidas, conforme as condições ambientais em que é submetida, ficando mais vulnerável ao ataque de agentes biológicos (VIVIAN et al., 2012).

De acordo com Szucs et al. (2015) a baixa durabilidade de algumas madeiras pode ser suprida com o uso de tratamentos químicos, podendo assim, alcançar durabilidade próxima, igual ou até mesmo superior a de árvores naturalmente resistentes. Estes tratamentos podem trazer melhora as propriedades de madeiras menos resistentes contribuindo com a preservação das florestas nativas (SZUCS et al., 2015).

A massa específica da madeira é considerada um dos parâmetros de maior importância na avaliação da qualidade do material, devido se tratar de uma propriedade de fácil determinação e estar diretamente relacionada às demais características relevantes na classificação da madeira (SHIMOYAMA; BARRICHELLO, 1991). Conforme Oliveira, Hellmeister e Filho (2005) as madeiras com menor variação na densidade são ideais para utilizações que requerem um material mais homogêneo e com pouca variabilidade nas propriedades físicas e mecânicas.

Segundo Kaskantzis (2015) as madeiras de coníferas são mais uniformes do que as de folhosas, quanto ao seu aspecto, apresentando lenho inicial e final distintos conforme a sua densidade. Por ser um material anisotrópico, é possível avaliar suas propriedades em três planos de observação: transversal, radial e o

tangencial (Figura 2).

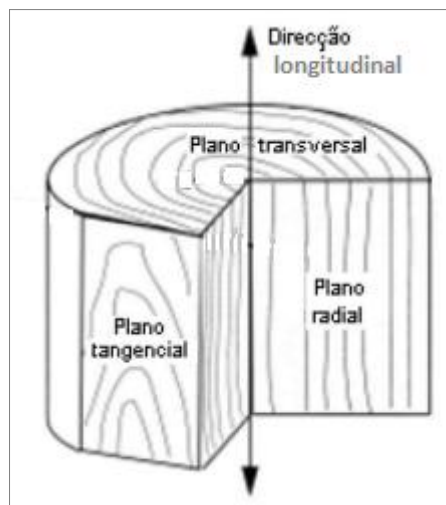


Figura 2 - Planos de observação das propriedades da madeira.
Fonte: KASKANTZIS, 2015.

Já quantificação do teor de umidade e da variação do mesmo nas peças de madeira é um fator essencial, visto que uma madeira que se encontra com teor de umidade muito alto restringe suas possibilidades, como na construção civil ou indústria de móveis, por exemplo (OLIVEIRA; HELLMEISTER; FILHO, 2005). O autor ainda afirma que elevados gradientes de umidade da madeira causam possíveis defeitos nas peças, principalmente durante o processo de secagem, onde ocorrem empenamentos, fendilhamentos, dentre outros defeitos.

Com a grande procura por madeiras para os diversos setores industriais, as espécies de reflorestamento mais utilizadas hoje no Brasil, com a finalidade de suprir esta grande demanda, são madeiras da espécie de *Pinus* e *Eucalyptus* devido sua ótima adaptação ao clima brasileiro, especialmente da região sul e sudeste, rápido crescimento e por serem madeiras mais acessíveis no mercado (FERNANDES et al., 2018).

Segundo Evans et al. (2000), nas propriedades mecânicas os módulos de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) da madeira são influenciados por alguns fatores como porcentagem de madeira juvenil, densidade, teor de umidade, quantidade de nós, dentre outros fatores. Estas características da madeira podem reduzir consideravelmente sua resistência mecânica (EVANS et al., 2000). Também vale ressaltar que mesmo corpos-de-prova idênticos da mesma espécie, podem resultar em dados consideravelmente diferentes com relação à resistência (LARSON et al., 2001; RESCH, H.; PARKER, 1979).

3.3 Tratamento da madeira (impregnação)

De acordo com Calil Neto (2011) a preservação da madeira consiste na impregnação da mesma com produtos tóxicos aos organismos xilófagos, a fim de reduzir as chances de estes utilizarem a madeira como fonte de sobrevivência e multiplicação, além de proporcionar uma maior durabilidade a madeira. Este produto deve ter baixa toxidez aos organismos não xilófagos, possuir ótima fixação na madeira e ser duradouro, além de preferencialmente ser inodoro, incolor e não inflamável. Porém muito dificilmente algum produto apresentará todas estas características (CALIL NETO, 2011).

A impregnação da madeira se dá através da introdução de determinados produtos químicos de forma líquida no interior da mesma (SCHNEIDER; WITT, 2004). Segundo Gomes (1996) a penetração dos produtos se dá primordialmente por condução pelos vasos da madeira nas folhosas e pelos traqueídeos nas coníferas, logo a penetração requer dimensões favoráveis dos mesmos. De acordo com Gomes (1996), de modo geral estes processos de modificação das propriedades da madeira têm sido executados através de tratamentos mais usuais, utilizando produtos como alcatrão, creosotos e resinas. Essa impregnação normalmente é feita por imersão, vácuo-imersão ou vácuo-pressão conforme a Figura 3 (GOMES, 1996).

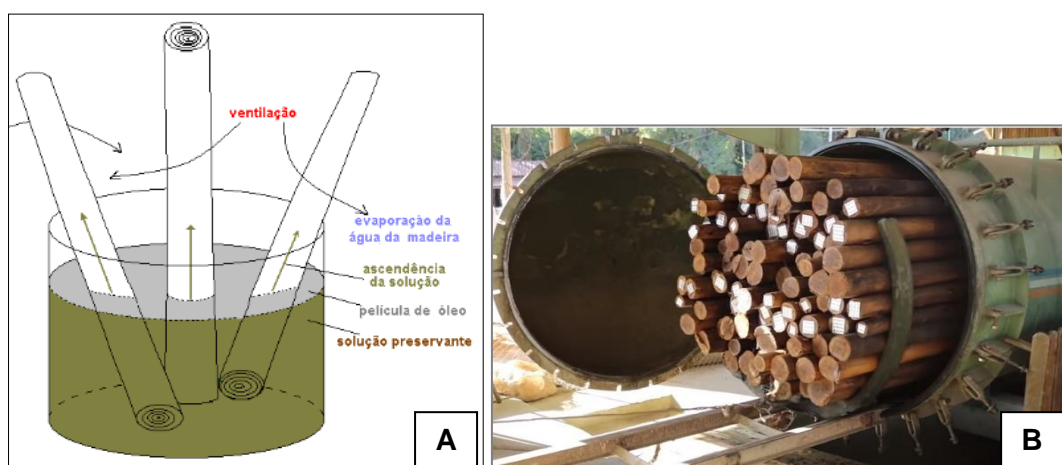


Figura 3 - Métodos de impregnação (A) imersão; (B) vácuo-pressão.
Fonte: MORESCHI, 2013; VALE AGRÍCOLA, 2020.

Geralmente as madeiras mais utilizadas para impregnação são as que apresentam baixa densidade, por possuir porosidade suficiente para o processo,

facilitando assim a penetração do produto utilizado (MANRICH, 1984). Para madeiras que normalmente apresentam elevadas propriedades físicas, mecânicas e massa específica, não se torna viável o processo de impregnação, já que esse fator torna o processo extremamente complexo por dificultar a passagem dos produtos químicos, e caro.

Schneider e Witt (2004) afirmam que os monômeros das resinas mais utilizados são dos tipos vinílicos, como o estireno, metacrilato de metila e a acrilonitrila.

3.4 Tratamento por vácuo-pressão (autoclave)

Segundo Barillari e Freitas (2002) no método de tratamento por vácuo-pressão as peças de madeira são inicialmente submetidas a um vácuo inicial de 650 mmHg e depois imersas no produto desejado, o qual é inserido no sistema ainda com o auxílio do vácuo. A impregnação ocorre com uma pressão superior à atmosférica, cerca de 18 Kgf/cm², pois resulta em uma melhor absorção e penetração do produto na madeira. Este tipo de processo é muito utilizado industrialmente no tratamento de postes e moirões (Figura 4) com produtos químicos e a duração do ciclo de tratamento é de aproximadamente 4 horas. Os principais preservantes utilizados para evitar a degradação biológica da madeira são o creosoto, o CCA (arseniato de cobre cromatado) e o CCB (borato de cobre cromatado) (MANRICH, 1984; BARILLARI & FREITAS, 2002).

O processo de célula-cheia (Bethell) é empregado quando a intenção é a retenção máxima de produto químico, além de uma penetração uniforme na madeira (LEBOW, 2010; KRETSCHMANN, 2010). Pinheiro e Rocco (2012) demonstraram que a preservação química através de vácuo-pressão com preservativos hidrossolúveis não provocam redução nas propriedades mecânicas podendo, em alguns casos, até elevar as mesmas.



Figura 4 - Tratamento de postes por autoclave.
Fonte: Autor, 2021.

3.5 Polimerização (cura da resina)

Segundo Chawla (1998), a reação química na qual os monômeros são ligados para a formação do polímero é chamada de polimerização. A polimerização do produto impregnado na madeira geralmente pode ser feita através do aumento da temperatura. Conforme Schneider e Witt (2004), na utilização deste processo os compostos se decompõem facilmente em radicais livres, o que torna o processo mais simples e econômico. Neste processo, a degradação da madeira é praticamente nula, pois a temperatura necessária para a cura geralmente não ultrapassa os 100°C, além dos riscos à segurança do operador ser baixos, dependendo dos produtos utilizados (SCHNEIDER; WITT, 2004).

Segundo Sebastião (2006), durante esta reação pode-se ter polimerização em etapas, polimerização em cadeia e polimerização com abertura de anel. Na polimerização em cadeia, que ocorre no polímero utilizado neste trabalho, há abertura de uma dupla ligação química que estabelece ligações simples, este processo é exotérmico, por tanto ocorre liberação de calor (SEBASTIÃO, 2006). Segundo o mesmo autor a reação acontece através da iniciação, que gera o centro ativo. Após, ocorre à propagação, onde se dá à transferência do centro ativo de monômero a monômero e logo após ocorre o término da reação, onde o centro ativo desaparece, podendo acontecer de várias maneiras dependendo do monômero e das condições de polimerização (SEBASTIÃO, 2006).

4 Metodologia

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas no curso de Engenharia Industrial Madeireira, pertencente à Universidade Federal de Pelotas/RS.

4.1 Matéria-prima

Para o presente trabalho foram utilizadas três espécies de madeiras (*Pinus elliottii*, *Eucalyptus grandis* e *Araucaria angustifolia*) provenientes do estoque de madeiras do curso (Figura 5), as quais já estavam na forma de tábuas. A madeira de *Araucaria angustifolia* possuía aproximadamente 40 anos de idade, o *Pinus elliottii* 23 anos e o *Eucalyptus grandis* 22 anos, todas provenientes do estado do Rio Grande do Sul, das cidades de Pelotas, Piratini e Tapes, respectivamente. A Figura 6 demonstra o local de onde os corpos-de-prova foram retirados, em relação a medula.



Figura 5 - Tábuas armazenadas no campus do curso (A) pinus e eucalipto; (B) araucária.
Fonte: Autor, 2021.



Figura 6 - Local onde foram retirados os corpos-de-prova.
Fonte: Autor, 2021.

A resina utilizada foi fornecida pela empresa Colméia Resinas, a qual é composta basicamente por ésteres de metacrilato, e já estava devidamente pronta para o uso, apenas necessitando da adição do catalisador fornecido pela própria empresa.

4.2 Preparação das amostras

As tábuas foram serradas com o auxílio de uma serra esquadrejadeira nas dimensões necessárias para a confecção das amostras para os ensaios físicos e mecânicos. Para cada espécie foi confeccionados um total de 46 amostras, sendo 32 amostras direcionadas para as propriedades mecânicas e densidade e 14 amostras para as demais propriedades físicas (teor de umidade e retratibilidade) (Figura 7).

As amostras ficaram acondicionadas em câmara climatizada (65% de umidade relativa do ar, temperatura de 20°C) até atingir umidade de equilíbrio higroscópico (~12 a 15%).



Figura 7 - Amostras para avaliação de propriedades físicas e mecânicas.
Fonte: Autor, 2021.

4.3 Impregnação

Para o processo de impregnação da madeira com a resina foram utilizadas 40 amostras para cada espécie analisada, as outras 6 amostras restantes de cada espécie não foram impregnadas, sendo estas destinadas para se obter o teor de umidade. As quantidades e dimensões das amostras para avaliação das propriedades das espécies analisadas podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Dimensões das amostras para avaliação das propriedades da madeira.

| Ensaio | Quantidade | Dimensões (cm) | | |
|---------------------|------------|----------------|---------|-------------|
| | | Espessura | Largura | Comprimento |
| Flexão estática | 8 | 1,5 | 1,5 | 25 |
| Flexão dinâmica | 8 | 1,5 | 1,5 | 25 |
| Compressão paralela | 8 | 2,5 | 2,5 | 10 |
| Dureza janka | 8 | 2 | 4 | 5 |
| Retratibilidade | 8 | 2 | 2 | 10 |

As amostras foram impregnadas de forma aleatória devido a limitações de espaço dentro do equipamento. Na Figura 8 encontram-se as imagens dos corpos de prova para cada ensaio físico e mecânico.

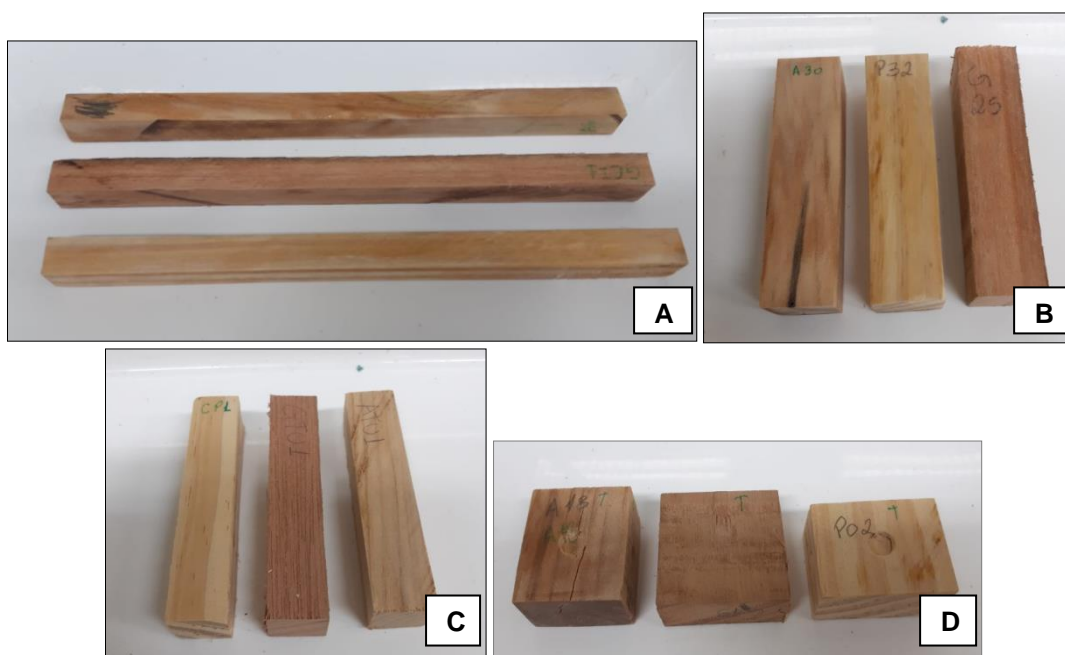


Figura 8 - Amostras para os ensaios de: (A) flexão estática e dinâmica; (B) compressão paralela; (C) retratibilidade; (D) dureza janka.

Fonte: Autor, 2021.

Para a impregnação dos corpos-de-prova utilizou-se aproximadamente 7 litros de resina de impregnação (Colméia Resinas) (Figura 9A) no processo de tratamento por autoclave. Devido à empresa produzir componentes de segredo industrial, não foi fornecido maiores informações sobre a resina. Primeiramente, as madeiras foram inseridas em uma câmara cilíndrica (autoclave) (Figura 9B) e após fechado. Posteriormente, as amostras foram submetidas a 20 minutos de vácuo inicial por meio do uso de uma bomba a vácuo, com o intuito de remover o ar presente no

equipamento e na madeira, a fim de facilitar a penetração do produto na mesma.

Após, a resina foi adicionada devido a diferença de pressão presente no interior do equipamento, utilizando pressão de 8 kgf/cm² com o auxílio de um compressor de pequeno porte. As madeiras foram tratadas por um período de 4 horas, até que a resina ocupasse os espaços intra-celulares da madeira. Por fim, o equipamento foi esvaziado cuidadosamente e retiradas às madeiras já impregnadas conforme Figura 10.



Figura 9 - Resina de impregnação Colméia Resinas (A) e Equipamento de tratamento autoclave (B).
Fonte: Autor, 2021



Figura 10 - Amostra após tratamento em autoclave.
Fonte: Autor, 2021.

Neste processo, ao todo foram impregnados 120 corpos de prova. Todas as madeiras foram submetidas nas mesmas condições de impregnação. Após, iniciou-se o processo de cura da resina, onde os corpos-de-prova já impregnados foram levados a estufa de temperatura controlada por três ciclos de uma hora cada (Figura

11), nas temperaturas de 60, 80 e 90°C, conforme orientação do fabricante da resina. Finalizada esta etapa, as amostras secas foram lixadas com o auxílio de uma lixadeira de cinta para remoção do excesso de resina seca presente na base das amostras.



Figura 11 - Secagem em estufa das amostras impregnadas para retratibilidade.
Fonte: Autor, 2021.

4.4 Propriedades físicas

4.4.1 Teor de umidade

Para determinação do teor de umidade (TU) adaptou-se a norma ASTM D 2395 (2017). Para aferir o TU, foram selecionados 6 corpos-de-prova de cada espécie com as dimensões de 2 cm x 2 cm x 10 cm. Inicialmente, pesou-se todos os corpos-de-prova a fim de obter sua massa úmida (M1), após os mesmos foram secos em estufa a 103°C ± 3°C até obter massa constante (Figura12). Por fim, a massa foi aferida novamente (M2) obtendo sua massa seca. Dessa forma, o teor de umidade (TU) foi calculado de acordo com a equação 1.

$$TU = \frac{M1 - M2}{M2} * 100 \quad \text{Equação 1}$$

Em que: TU= Teor de umidade da amostra (%);

M1 = Massa inicial da amostra acondicionada em câmara climatizada (g);

M2 = Massa da amostra após secagem em estufa (g).



Figura 12 - Secagem em estufa das amostras para teor de umidade.
Fonte: Autor, 2021.

4.4.2 Massa específica

A massa específica da madeira independe do tamanho do corpo-de-prova e é definida pela razão entre a massa de uma peça e seu volume. Com isso, foi realizada a determinação da massa específica dos corpos-de-prova antes e após serem impregnados com resina. Para isto, utilizou-se os 120 corpos de prova a fim de se obter os dados de massa a 12% de umidade (M) e volume (V) das amostras ao mesmo TU, com e sem tratamento. Dessa forma, a massa específica foi calculada a partir da equação 2.

$$ME = \frac{M_{12}}{V_{12}} \quad \text{Equação 2}$$

Em que: ME = massa específica a 12% de umidade (g/cm^3); M = massa da amostra a 12% de umidade (g); V = volume da amostra a 12% de umidade (cm^3).

4.4.3 Ganho de massa

A mesma expressa a quantidade de resina (%) que foi impregnada na madeira, a massa das amostras foi obtida através de uma balança semi analítica de precisão 0,01g.

Para obter o percentual de ganho de massa após a impregnação dos corpos de prova com a resina, utilizou-se a equação 3.

$$GM = \frac{Qr * 100}{Ma}$$

Equação 3

Em que: GM = Ganho de massa (%); Qr= Quantidade de resina impregnada na amostra (g); Ma = massa da amostra antes da impregnação (g).

4.4.4 Retratibilidade

Para avaliação dessas propriedades, foi realizado a contração e o inchamento dimensional nos planos anatômicos radial e tangencial, como também a contração e inchamento volumétrico das amostras, conforme a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

Para obtenção dos dados referentes à contração e inchamento dimensional e volumétrico, foram utilizados 8 corpos de prova para cada espécie, os quais tiveram suas dimensões nos planos radial e tangencial aferidas com auxílio de um micrometro digital (precisão de 0,001), e seu comprimento com um paquímetro analógico (precisão de 0,01). Todas as amostras foram marcadas com lápis cópia em cada plano anatômico com o intuito de medir sempre no mesmo local.

Primeiramente, os corpos de prova foram saturados em um dessecador (Figura 13A) com o auxílio de uma bomba a vácuo até não haver liberação de bolhas de ar do interior da madeira e obter massa constante dos mesmos. Após esse processo, foram aferidas as dimensões dos corpos-de-prova já saturados (D_u), em seguida as amostras foram levadas para estufa a uma temperatura de aproximadamente 103°C (Figura 13B) até obterem massa constante, para novamente serem obtidas suas dimensões secas (D_o). Durante todo processo também se obteve a massa dos corpos de prova a 12% de umidade bem como suas dimensões úmidas, saturados e totalmente secos.



Figura 13 - Etapas de saturação (A) e secagem (B) das amostras impregnadas.

Fonte: Autor, 2021.

Com estes dados, através das equações 4 e 5, foi obtido os coeficientes de contração e inchamento dimensional. Para as propriedades de contração e inchamento volumétrico, foram utilizadas as equações 6 e 7.

$$\beta D(\%) = \frac{(D_u - D_o)}{D_u} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

$$\alpha D(\%) = \frac{(D_u - D_o)}{D_o} \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

Em que: β = coeficiente de contração dimensional (%); α = coeficiente de inchamento dimensional (%); D_u = dimensão do corpo-de-prova no estado saturado (cm); D_o = dimensão do corpo-de-prova no estado seco em estufa (cm).

$$\beta V(\%) = \frac{(V_u - V_o)}{V_u} \times 100 \quad \text{Equação 6}$$

$$\alpha V(\%) = \frac{(V_u - V_o)}{V_o} \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

Em que: βV = coeficiente de contração volumétrica (%); αV = coeficiente de inchamento volumétrico (%); V_u = volume do corpo-de-prova no estado saturado (cm³); V_o = volume corpo-de-prova no estado seco em estufa (cm³).

A determinação do coeficiente de anisotropia para as propriedades de contração (A_c) e de inchamento (A_i) dimensional, utilizou-se as equações 8 e 9 (MORESKI, 2005).

$$A_c = \frac{\beta_t}{\beta_r} \quad \text{Equação 8}$$

$$A_i = \frac{\alpha_t}{\alpha_r} \quad \text{Equação 9}$$

Onde: A_c = coeficiente de anisotropia para contração; A_i = coeficiente de anisotropia para inchamento; β_t = contração tangencial; β_r = contração radial; α_t = inchamento tangencial; α_r = inchamento radial.

4.5 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas foram realizadas em 32 amostras. Destas, 8 amostras de cada espécie foram destinadas para cada uma das quatro propriedades mecânicas (flexão estática e dinâmica, compressão paralela e dureza janka). Os testes foram realizados em corpos-de-prova impregnados a fim de comparar os dados aqui obtidos com dados de madeiras sem nenhum tipo de tratamento.

4.5.1 Dureza Janka

Os ensaios mecânicos de dureza janka foram realizados nos dois planos anatômicos (radial e tangencial) de acordo com a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

Para realização do ensaio, a amostra foi alocada em máquina universal de ensaio (EMIC) com capacidade nominal de carga de 30 toneladas (Figura 14) no plano anatômico radial e posteriormente no tangencial. Para este ensaio não foi necessário a realização de cálculos, já que o equipamento informa o valor da dureza em relação a 1 cm, o que gera o resultado diretamente. A velocidade de avanço utilizada foi de 6 mm/min.

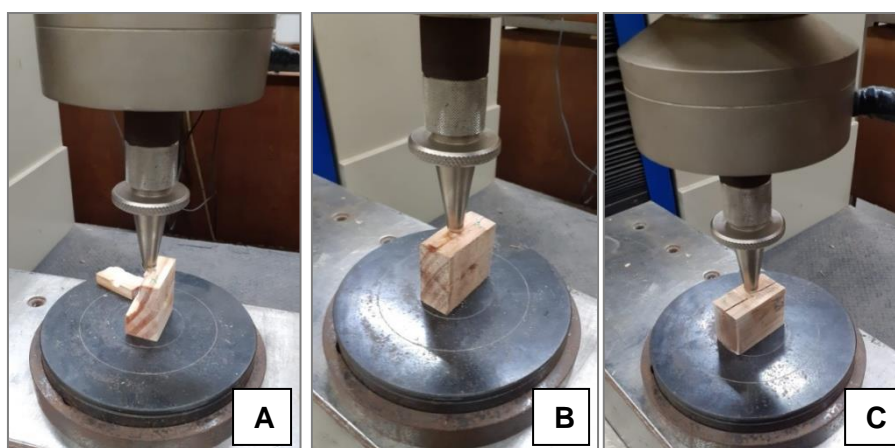


Figura 14 - Ensaio de Dureza janka no plano radial (A) pinus; (B) araucária; (C) eucalipto.
Fonte: Autor, 2021.

4.5.2 Flexão Estática

Para este ensaio, os corpos-de-prova foram alocados em uma máquina universal de ensaios (EMIC) com o sentido da medula posicionado para cima e

possuindo um vão livre de 21 cm (Figura 15) onde aplicou-se a carga, conforme a norma ASTM D143-94 (2017).

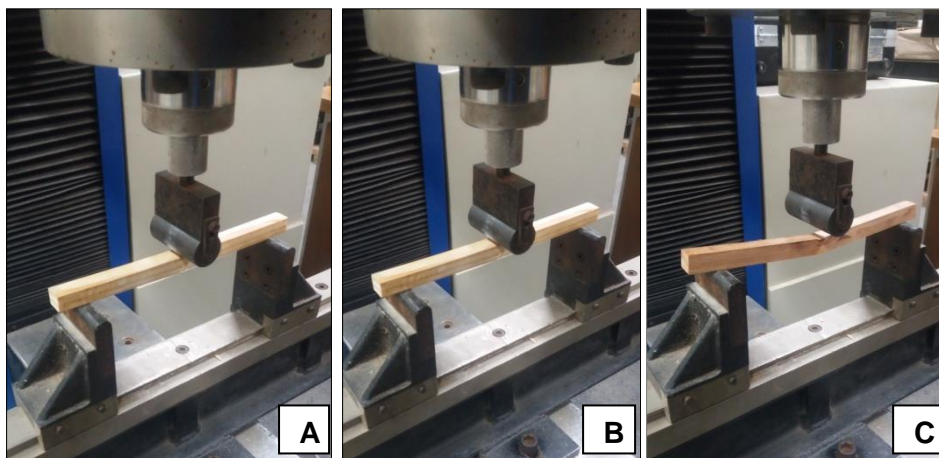


Figura 15 - Ensaio de flexão estática (A) pinus; (B) araucária; (C) eucalipto.
Fonte: Autor, 2021.

O módulo de elasticidade (MOE) foi fornecido pelo próprio equipamento, enquanto o respectivo módulo de ruptura (MOR) foi calculado conforme a equação 10.

$$\text{MOR} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_{\text{max}} \cdot L}{b \cdot h^2} \quad \text{Equação 10}$$

Onde: MOR = módulo de ruptura (kgf/cm²); L = vão entre os pontos de apoio (cm); b = base tangencial (cm); h = altura radial (cm); P_{máx} = Carga máxima aplicada (kgf).

4.5.3 Flexão Dinâmica

Para este teste os corpos-de-prova foram ensaiados em um Pêndulo de Charpy (Figura 16), onde se submeteu o impacto na região central da amostra. Para o ensaio utilizou-se o vão máximo permitido pela máquina de 7 cm. Após a queda do pêndulo, ocorre o impacto com a amostra obtendo-se assim o trabalho absorvido (W) em kgcm na escala graduada da máquina.



Figura 16 - Ensaio de flexão dinâmica.
Fonte: Autor, 2021.

Para os cálculos, o trabalho absorvido foi transformado em kgm através da relação: 1 kgcm = 0,01 kgm. O coeficiente de resiliência (K) e a cota dinâmica (CD) foram calculados a partir das equações 11 e 12, conforme a norma AFNOR-IPT, descrito por Moreschi (2014).

$$K = \frac{W}{b * h^{\frac{10}{16}}} \quad \text{Equação 11}$$

$$CD = \frac{K}{ME^2} \quad \text{Equação 12}$$

Onde: K = coeficiente de resiliência (kgm/cm²); W = trabalho absorvido para romper o corpo-de-prova (kgm); b e h = largura e altura, respectivamente, da seção transversal (cm); CD = cota dinâmica; ME = massa específica(g/cm³).

4.5.4 Compressão paralela

Para este ensaio utilizou-se a norma ASTM D143 (1995), onde foram ensaiados 8 corpos de prova impregnados para cada espécie analisada. Os mesmos

foram alocados em máquina de ensaios com extensômetro preso no centro da amostra a fim de verificar a deformação sofrida (Figura 17). Os resultados obtidos de MOE e MOR foram fornecidos pelo próprio equipamento.

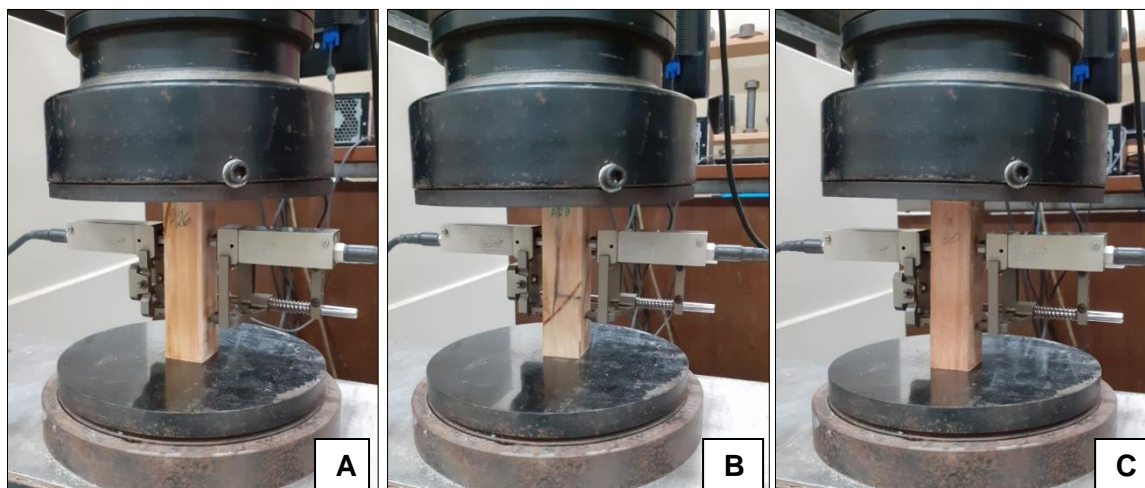


Figura 17 - Ensaio de compressão paralela (A) pinus; (B) araucária; (C) eucalipto.
Fonte: Autor, 2021.

4.5.5 Análise estatística

A análise estatística dos dados foi realizada com o auxílio do software *Sisvar*, para isso foi utilizado o teste de médias de Scott-Knott (SCOTT; KNOTT, 1974), todos com confiabilidade de 95%, para assim constatar se ocorreu diferença significativa nos dados e se obter as médias e o desvio padrão dos valores encontrados em todos os testes.

5 Resultados e Discussão

5.1 Teor de umidade e massa específica

Conforme a Tabela 2 observou-se que o teor de umidade analisado não obteve variação significativa entre as espécies pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. O valor esperado para as amostras era entre 12 a 15% de umidade, já que para garantir um melhor desempenho da madeira e evitar variações dimensionais, o teor de umidade adequado para madeira é de 12% \pm 3% (MOHAMMAD et al., 2012). O resultado obtido demonstra que os corpos-de-prova estavam nas mesmas condições de umidade antes de serem tratados, apresentando valores em torno de 13%.

Tabela 2 - Valores médios de teor de umidade bem como massa específica antes e após impregnação.

| Espécies | Teor de umidade (%)[*] | ME antes (g/cm³)[*] | ME após (g/cm³)[*] |
|-------------------------------|--|--|---|
| <i>Pinus elliottii</i> | 13,60 a | 0,575 a | 1,00 b |
| <i>Eucalyptus grandis</i> | 13,10 a | 0,599 a | 0,678 a |
| <i>Araucaria angustifolia</i> | 13,57 a | 0,600 a | 1,092 c |
| CV (%) | 3,74 | 8,00 | 9,48 |

* = Letras diferentes entre linhas denotam diferença estatística a 95% de probabilidade pelo teste ANOVA de Scott-Knott; CV = coeficiente de variação.

Para os valores de massa específica, observou-se que as espécies analisadas apresentaram diferença estatística após o tratamento, porém os mesmos não obtiveram essa diferença antes da impregnação com resina, demonstrando que a massa específica não tem relação direta com a capacidade de a madeira absorver o produto em seus espaços internos. Durlo (1988) e Beltrame et al.(2010) encontraram valores médios para densidade de 0,530 e 0,512 g/cm³ para as espécies de *Pinus elliottii* e *Araucaria angustifolia*, respectivamente, estando próximos aos analisados neste trabalho para as madeiras antes da impregnação. Conforme Valério et al. (2008) a massa específica pode variar muito devido a alguns fatores como a idade, local de origem, espaçamento no plantio e taxa de crescimento da árvore. Para as amostras de eucalipto antes da impregnação (Tabela 2) o valor médio para massa específica foi superior ao encontrado por Xavier (2008)

que verificou densidade de 0,380 g/cm³, isto provavelmente devido a algum dos fatores citados anteriormente.

Segundo a classificação de Carvalho (1996) madeiras com massa específicas entre 0,50 a 0,59 g/cm³ são consideradas moderadamente pesadas, 0,60 a 0,70 g/cm³ consideradas pesadas e acima de 0,70 g/cm³ muito pesadas. Dessa forma, verificou-se que as madeiras de coníferas após o tratamento com resina obtiveram sua densidade aumentada obtendo um aumento médio de 78,19%, podendo assim ser classificadas como muito pesadas. Além disso, foi verificado que a madeira de *Eucalyptus grandis* não obteve um aumento significativo após a impregnação, sendo que a mesma obteve um ganho em massa de apenas 13,18%, passando a ser classificada como pesada, valor este que pode está diretamente relacionado com a baixa impregnação ocorrida nesta espécie. Possivelmente isto ocorreu devido a presença de cerne nos corpos-de-prova desta espécie, já que o mesmo é composto por células inativas que obstruem a passagem de fluidos no interior da madeira (IPT, 2021).

5.2 Ganho de massa

Com relação ao percentual de ganho de massa, percebe-se que ocorreu diferença estatística entre as três espécies analisadas. As madeiras de pinus e araucária obtiveram altos índices de impregnação, no entanto demonstraram essa diferença estatisticamente conforme a Tabela 3. Em contra partida, a madeira de eucalipto obteve um baixo resultado de impregnação, podendo estar relacionado a diversos fatores anatômicos característicos da espécie. Na Figura 18 foi possível observar o grau de impregnação das três espécies de madeira analisadas, onde foi adicionado corante à resina a fim de se ter melhor visualização da penetração nas mesmas. Da esquerda para direita: madeira sem impregnação, madeira impregnada, madeira impregnada com corante na resina.

Tabela 3 - Valores médios para percentual de ganho de massa das amostras.

| Espécies | GM (%)* |
|-------------------------------|----------------|
| <i>Pinus elliottii</i> | 74,12 b |
| <i>Eucalyptus grandis</i> | 14,19 a |
| <i>Araucaria angustifolia</i> | 81,55 c |
| CV(%) | 23,61 |

* = Letras diferentes entre linhas denotam diferença estatística a 95% de probabilidade pelo teste ANOVA de Scott-Knott; GM = percentual de ganho de massa; C.V. = coeficiente de variação.

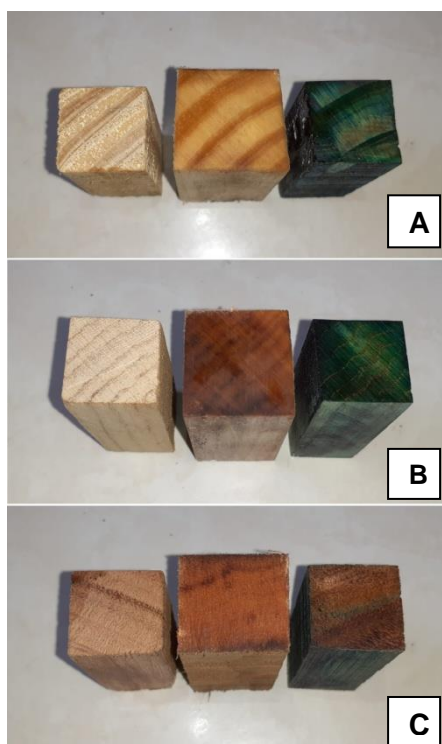


Figura 18 - Grau de impregnação da resina (A) *Pinus elliottii*; (B) *Araucaria angustifolia*; (C) *Eucalyptus grandis*.
Fonte: Autor, 2021.

Figueiredo et al. (2020) obteve para a madeira de eucalipto um ganho de massa de 9,59% com acetilação, valor próximo ao verificado neste estudo. Vale ressaltar que a impregnação da literatura para o eucalipto foi realizada com materiais e processos diferentes dos aqui testados, porém a resina aqui utilizada expressa eficiência no ganho de massa e assim consecutivamente no aumento de massa específica das madeiras analisadas.

Mattos et al. (2015) verificaram em seus estudos um percentual de 50% de ganho de massa para a impregnação de metacrilato na madeira de *Pinus*, valor este relativamente baixo quando comparado com ambas as espécies de coníferas analisadas, onde se obteve 74,12 e 81,55% de impregnação com resina de ésteres

de metacrilato. A viscosidade do produto utilizado e os parâmetros do processo são fatores que podem ter influenciado neste resultado, já que os autores submeteram 1 hora de pressão, tempo este inferior ao utilizado neste trabalho.

Segundo Siau (1984), os vasos podem corresponder até a 60% do volume nas angiospermas e são o principal caminho de penetração dos produtos químicos no interior da madeira de folhosas, devido o plano longitudinal possuir a menor resistência à passagem dos fluidos e permitir a penetração dos produtos através dos pares de pontoações dos vasos. Todavia o *Eucalyptus grandis* apresenta diâmetro e quantidade dos vasos desfavoráveis para a impregnação com a resina utilizada (Tabela 4), possivelmente por fatores como a viscosidade do produto, o que dificultou à penetração da mesma na madeira de eucalipto. Conforme Figura 19 pode-se observar as diferenças anatômicas entre as coníferas e a folhosa, antes da impregnação com resina. As Figuras 19A e 19C encontram-se com aumento de 40x e a Figura 19B com aumento de 10x.

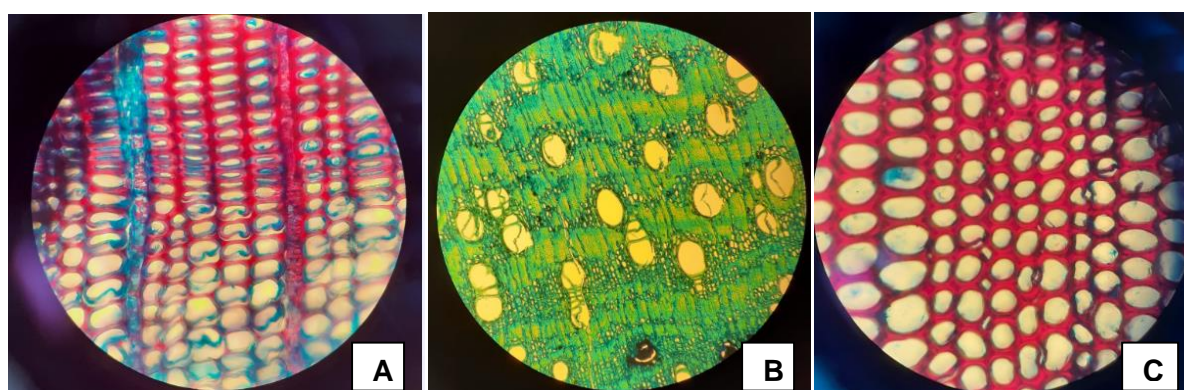


Figura 19 - Imagem anatômica das madeiras de *Pinus elliottii* (A), *Eucalyptus grandis* (B) e *Araucaria angustifolia* (C).

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 4 - Valores médios do diâmetro em micrometros para traqueídeos, vasos e raios das madeiras.

| Espécie | Traqueídeos (μm)* | Vasos (μm)* | Raios (μm)* |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <i>Pinus elliottii</i> | 23,96 a | - | 13,30 a |
| <i>Eucalyptus grandis</i> | - | 239,26 a | 24,47 b |
| <i>Araucaria angustifolia</i> | 45,49 b | - | 16,04 a |

* = Letras diferentes entre linhas denotam diferença estatística a 95% de probabilidade pelo teste ANOVA de Scott-knott.

Outro fator crucial na impregnação do *Eucalyptus* é a questão do cerne e alborno, pois a madeira de alborno é uma estrutura formada por células ativas,

enquanto no cerne estas células estão inativas, além de poder conter resinas, gomas, compostos fenólicos e óleos (PEREIRA et al., 2013), fatores estes que tornam o cerne uma parte da madeira com difícil penetração de fluidos, visto que os caminhos disponíveis para a passagem do produto químico podem estar interrompidos. Segundo Silva et al. (2010) avaliaram a permeabilidade do alburno de *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus grandis*, através da passagem de água destilada e um produto à base de óleo de neem, onde foi possível observar que o alburno de ambas as espécies é de possível impregnação para os produtos utilizados.

Em geral, as madeiras de coníferas obtiveram o melhor resultado de impregnação, principalmente por apresentarem elevado número de traqueídeos na sua composição anatômica, aproximadamente 0,6 a 0,8 milhões de traqueídeos/cm³, e porosidade favorável (KOLLMANN et al., 1975), fator este que pode ter facilitado com que a resina conseguisse penetrar totalmente no interior da madeira, causando assim elevado ganho de massa e aumento na densidade das madeiras analisadas.

5.3 Retratibilidade

De acordo com a Tabela 5 observou-se que a contração e inchamento para as madeiras de coníferas no plano radial foram similares, estando em torno de 6%, não apresentando diferença significativa estatisticamente. Contudo, obtiveram maior variação nos resultados quando analisadas no plano tangencial, onde foi possível perceber uma variação significativa nos dados, em que o pinus obteve valores próximos de 10%. Nas amostras de eucalipto a variação dimensional no plano radial foi inferior as madeiras de coníferas, porém no plano tangencial estes valores já não obtiveram diferença significativa quando comparados com os da madeira de araucária, que estavam em torno de 5,5%.

Tabela 5 - Valores médios para contração e inchamento dimensional e volumétrico, e respectivos coeficientes de anisotropia, após a impregnação.

| Variável | | <i>Pinus</i> | <i>Eucalyptus</i> | <i>Araucaria</i> | CV (%) |
|-----------------|------------|------------------|-------------------|---------------------|--------|
| | | <i>elliottii</i> | <i>grandis</i> | <i>angustifolia</i> | |
| β D (%)* | Radial | 6,25 a | 3,59 b | 6,02 a | 17,69 |
| | Tangencial | 9,24 b | 5,22 a | 5,91 a | 13,22 |
| α D (%)* | Radial | 6,69 b | 3,73 a | 6,41 b | 18,74 |
| | Tangencial | 10,19 b | 5,51 a | 6,29 a | 14,19 |
| β V (%)* | | 15,12 c | 8,76 a | 12,56 b | 9,53 |
| α V (%)* | | 17,82 c | 9,61 a | 14,41 b | 10,87 |
| Ac* | | 1,58 b | 1,47 b | 0,99 a | 26,83 |
| Ai* | | 1,65 b | 1,50 b | 0,99 a | 28,95 |

* = Letras diferentes entre linhas denotam diferença estatística a 95% de probabilidade pelo teste ANOVA de Scott-Knott; β D = contração dimensional; α D = inchamento dimensional; β V = contração volumétrica; α V = inchamento volumétrico; Ac = coeficiente anisotropia de contração; Ai = coeficiente anisotropia de inchamento; CV = coeficiente de variação.

De acordo com os dados obtidos na literatura referente às mesmas madeiras sem impregnação, para a propriedade de contração foram obtidos valores de 3,9% e 5,8% nos planos radial e tangencial para o *Pinus elliottii*, e 4,4% e 6,1% para a *Araucaria angustifolia*, nos planos radial e tangencial, respectivamente (SANTINI; HASELEIN; GATTO, 2000). Para a espécie de *Eucalyptus grandis* a contração no plano radial foi 5,19% e tangencial 8,22% (CARVALHO et al., 2015).

Os valores médios encontrados na literatura para inchamento nas coníferas no plano tangencial foram de 8,60% e no plano radial 7,87% (PELOZZI et al., 2012), já o inchamento para o eucalipto foi de 5,47% radial e 8,96% tangencial. Estes valores apresentaram-se inferiores quando comparados com as madeiras de coníferas analisadas (Tabela 5). Porém, no caso do eucalipto os valores verificados foram superiores ou próximos aos encontrados na literatura, demonstrando que a resina utilizada no processo de impregnação pode ter influenciado de forma negativa com relação à contração e inchamento das madeiras, isto possivelmente pelo produto apresentar solubilidade em água.

Desta forma, quando as amostras foram saturadas, a resina presente no interior da madeira não conseguiu impedir a penetração da água nos corpos de prova e acabou sendo solubilizada. Conforme a Figura 20 foi possível observar uma película formada de resina dissolvida no fundo de dessecador, isto ocorreu constantemente durante todas as trocas de água.



Figura 20 - Resina dissolvida após processo de saturação das amostras.
Fonte: Autor, 2021.

Contudo, os dados analisados neste trabalho estão de acordo com Moreira (1999), que afirma que a maior alteração dimensional ocorre no sentido tangencial aos anéis de crescimento, seguida pela dimensão radial. No sentido longitudinal a variação dimensional é praticamente desprezível, sendo assim os valores obtidos para o plano longitudinal não foram abordados nos resultados, devido os valores serem muito pequenos e consecutivamente apresentarem coeficientes de variação extremamente elevados.

Para os dados de contração e inchamento volumétrico, todas as espécies obtiveram variação significativa, demonstrando que as mesmas têm comportamentos diferentes devido a vários fatores, inclusive no que se refere com a quantidade de resina impregnada, já que foi possível perceber que a resina interfere diretamente na relação de contração e inchamento das madeiras.

Para a contração volumétrica, os dados encontrados na literatura para as mesmas espécies utilizadas, mas sem tratamento, foram de 9,8% para o pinus e 10,4% para a araucária (SANTINI; HASELEIN; GATTO, 2000), para a madeira de eucalipto foi de 13,03% (CARVALHO et al., 2015). Já para o inchamento volumétrico, os valores médios encontrados para as coníferas foi de 17,41% (PELOZZI et al., 2012) e para o eucalipto foi de 14,99% (CARVALHO et al., 2015). Sendo assim, quando comparadas com as mesmas espécies de madeira sem impregnação da literatura, as madeiras de coníferas obtiveram uma piora na questão de contração e inchamento volumétrico, isto provavelmente por estas duas espécies terem obtido um melhor resultado na impregnação de resina. Todavia, para a espécie de *Eucalyptus grandis* os valores encontrados foram inferiores aos verificados na literatura, possivelmente por questões como idade da árvore, local de

plântio, dentre outras questões anatômicas.

Referente ao coeficiente de anisotropia apenas a *Araucaria angustifolia* obteve diferença significativa nos resultados (Tabela 5), por possuir menor coeficiente de anisotropia dentre as espécies estudadas. Para madeira sem tratamento de *Eucalyptus grandis*, Carvalho et al. (2015) obteve coeficientes de 1,59 e 1,65 para contração e inchamento, respectivamente. Mascarenhas et al. (2013) encontrou um fator anisotrópico médio de contração e inchamento de 2,49 e 1,88 respectivamente, para as madeiras de *Pinus elliotti* e *Araucaria angustifolia*. Percebe-se que os valores verificados pelos autores para a madeira de eucalipto são bem similares, porém nas coníferas os valores obtidos foram inferiores aos encontrados na literatura, principalmente para a madeira de araucária.

Segundo Oliveira et al. (2010), quanto maior o valor anisotrópico maior será a possibilidade da madeira ter variações dimensionais, o que por sua vez ocasionará em diversos defeitos, podendo comprometer a madeira conforme a finalidade que se pretende atingir. Durlo e Marchiori (1992) afirmam que a qualidade da madeira em relação ao coeficiente de anisotropia é excelente se obtido valores entre 1,2 a 1,5, normal de 1,5 a 2,0 e ruim acima de 2,0. Assim, pode-se classificar as madeiras após a impregnação como excelente para *Araucaria angustifolia* e *Eucalyptus grandis* e normal para o *Pinus elliottii*.

5.4 Flexão estática

De acordo com a Tabela 6, verificou-se que as madeiras da espécie de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* obtiveram resultados similares para o módulo de ruptura, enquanto que para a espécie de *Araucaria angustifolia* isto não ocorreu. Foi possível verificar que devido à diferença na massa específica, ocasionada pelo grau de impregnação de cada espécie, os resultados de módulo de elasticidade de todas as espécies tiveram variação significativa nos resultados dos testes.

Segundo Gallio et al. (2016) maiores módulos de elasticidade aumentam a capacidade da madeira retornar ao estado normal, sem que ocorra a deformação irreversível do material.

Tabela 6 - Valores médios para o ensaio de flexão estática, das madeiras impregnadas.

| Espécies | ME (g/cm ³)* | MOR (kgf/cm ²)* | MOE (kgf/cm ²)* |
|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <i>Pinus elliottii</i> | 0,980 b | 1.042,23 a | 86.279,42 a |
| <i>Eucalyptus grandis</i> | 0,660 a | 969,55 a | 136.168,64 c |
| <i>Araucaria angustifolia</i> | 1,122 c | 1.217,17 b | 110.816,79 b |
| CV (%) | 7,18 | 17,98 | 15,47 |

* = Letras diferentes entre linhas denotam diferença estatística a 95% de probabilidade pelo teste ANOVA de Scott-Knott; ME = massa específica; MOR = módulo de ruptura; MOE = módulo de elasticidade; CV = coeficiente de variação.

Mascarenhas et al. (2013) obteve em suas análises valores de 521,28 e 35.894 kgf/cm² para MOR e MOE, respectivamente para a madeira de *Pinus elliottii* sem tratamento. Para a madeira não tratada de *Araucaria angustifolia*, Melo et al. (2010) obteve MOE e MOR de 61.030 e 531,17 kgf/cm². Para estas duas espécies o tratamento com resina realizado neste estudo obteve aumento considerável nos dados analisados.

Com a madeira não tratada de *Eucalyptus grandis* os resultados ficaram bem próximos aos estudados por Silva (2002), que obteve 854 e 101.313 kgf/cm² para MOR e MOE, respectivamente. Essa variação se deve as amostras de *Eucalyptus grandis* não ter conseguido obter o mesmo nível de impregnação das outras duas espécies de coníferas. O fato do MOE da espécie de *Eucalyptus grandis* ter sido o maior provavelmente está ligado a questões características da própria espécie e não diretamente com a impregnação, já que o mesmo foi o menos impregnado.

Para a propriedade de flexão estática, a impregnação com resina se mostrou eficiente frente aos valores obtidos, chegando a alguns casos obter o dobro do resultado encontrado na literatura para madeiras das mesmas espécies sem nenhum tipo de tratamento.

5.5 Flexão dinâmica

Conforme a Tabela 7 foi possível observar os valores médios para cada propriedade do ensaio de flexão dinâmica. Os valores obtidos neste teste não obtiveram diferença significativa entre as espécies de *Pinus elliottii* e *Araucaria angustifolia*, possivelmente por estas espécies terem resultado em densidade muito próxima após a impregnação, o que não ocorreu com a espécie de *Eucalyptus grandis* que obteve diferença significativa nos dados.

Tabela 7 - Valores médios para o ensaio de flexão dinâmica, após impregnação.

| Espécies | ME (g/cm³)* | W (kg.m)* | K (kgm/cm²)* | CD* |
|-------------------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------|------------|
| <i>Pinus elliottii</i> | 1,030 b | 0,38 a | 0,19 a | 0,19 a |
| <i>Eucalyptus grandis</i> | 0,649 a | 0,63 b | 0,32 b | 0,75 b |
| <i>Araucaria angustifolia</i> | 1,106 b | 0,31 a | 0,16 a | 0,13 a |
| CV (%) | 9,16 | 49,89 | 49,88 | 61,44 |

* = Letras diferentes entre linhas denotam diferença estatística a 95% de probabilidade pelo teste ANOVA de Scott-Knott; ME = massa específica; W = trabalho absorvido; K = coeficiente de resiliência; CD = cota dinâmica; CV = coeficiente de variação.

Talgatti et al. (2015) obteve em seu estudo médias de 0,82 kgm para madeiras de *Pinus elliottii* e Beltrame et al. (2010) 1,02 kgm para madeiras de araucária, valores muito diferentes dos aqui obtidos, possivelmente devido a presença de produto no interior das madeiras analisadas.

Segundo Moreschi (2014) quanto maiores forem os valores de coeficiente de resiliência mais elevada é a resistência ao choque da madeira analisada. A cota dinâmica tem como principal função anular a influência causada pela variação de massa específica (MORESCHI, 2014). Talgatti et al. (2015) obteve para K e CD valores de 0,22 kgm/cm² e 0,33 para a madeira de pinus, assim como 0,16 kgm/cm² e 0,72 para a araucária, respectivamente. Para a espécie de *Eucalyptus grandis* os valores de trabalho absorvido, coeficiente de resiliência e cota dinâmica verificados foram de 1,57 kgm (PERTUZZATTI et al., 2017), 0,32 kgm/cm² (STANGERLIN et al., 2008) e 1,23 (PEDROSO; MATOS, 1987), respectivamente.

No presente estudo foi possível verificar que os valores referentes ao teste de flexão dinâmica foram inferiores aos encontrados na literatura para as mesmas espécies de madeira sem tratamento. Acredita-se que o motivo principal para isto ocorrer é devido à impregnação com resina a base de ésteres de metacrilato, que tornou a madeira mais rígida, porém com baixa resistência ao impacto. Conforme Carvalho (1996), madeiras com valores acima de 1,2 para cota dinâmica e coeficiente de resiliência que estejam de 0,4 a 1,0 kgm/cm² são classificadas como resistentes. Dessa forma, as madeiras aqui analisadas não podem ser classificadas como resistentes após terem passado pela impregnação com resina, que conforme o autor deveria ser classificado como pouco resistente.

5.6 Dureza janka

Nos resultados deste ensaio foi possível verificar diferença estatística para todas as espécies analisadas (Tabela 8). Isso salienta que o grau de impregnação influencia diretamente nos resultados, a julgar pelas diferenças nos valores de densidade dos corpos de prova, onde para as madeiras de coníferas, os valores de 0,837 e 1,064 g/cm³, chegaram a praticamente dobrar em relação aos dados obtidos na literatura.

Tabela 8 - Valores médios para massa específica e força nos planos radial e tangencial.

| Espécies | ME (g/cm³)* | Força radial (kgf)* | Força tangencial (kgf)* |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| <i>Pinus elliottii</i> | 0,837 b | 499,67 b | 615,56 b |
| <i>Eucalyptus grandis</i> | 0,703 a | 330,23 a | 383,28 a |
| <i>Araucaria angustifolia</i> | 1,064 c | 778,59 c | 1062,99 c |
| CV (%) | 5,96 | 17,39 | 24,63 |

* = Letras diferentes entre linhas denotam diferença estatística a 95% de probabilidade pelo teste ANOVA de Scott-Knott; ME = massa específica; Fradial = força no plano radial; Ftangencial = força no plano tangencial; CV = coeficiente de variação.

Santini, Haselein e Gatto (2000) obtiveram em suas análises forças máximas igual a 224 e 293 Kgf para a espécie de *Pinus elliottii* e 236 e 252 Kgf para a *Araucaria angustifolia* sem tratamento, nos planos radial e tangencial respectivamente, para as mesmas espécies analisadas neste trabalho. Percebe-se que após a impregnação da resina nas madeiras houve um melhoramento médio geral de aproximadamente 194% nas madeiras de coníferas com relação à força máxima suportada.

Segundo Xavier (2008) a espécie de *Eucalyptus grandis*, possui valores médios de 253,25 e 372,45 Kgf para os planos radial e tangencial, respectivamente. Observa-se que os dados obtidos pela literatura foram bem próximos aos valores obtidos no presente estudo para amostras impregnadas, demonstrando que o eucalipto não obteve um melhoramento tão significativo como se obteve nas coníferas.

5.7 Compressão paralela

Conforme Tabela 9 percebe-se que os valores obtidos neste estudo foram muito superiores aos analisados na literatura em relação ao módulo de elasticidade. Conforme Cruz et al. (2003) e Melo (2004) a madeira de eucalipto obteve média para o MOE de 91.703,07 e 78.681,30 Kgf/cm², respectivamente, já para o módulo de ruptura ambos os autores obtiveram 530,25 Kgf/cm². A diferença dos resultados ocorreu provavelmente por questões anatômicas da espécie do que diretamente a impregnação, já que a madeira de *Eucalyptus grandis* foi a que menos obteve variação na massa específica em relação ao tratamento. Para o valor de MOR encontrado na literatura, os resultados foram relativamente superiores aos obtidos no presente estudo.

Tabela 9 - Valores médios para o ensaio de compressão paralela.

| Espécies | ME (g/cm³)* | MOR (kgf/cm²)* | MOE (kgf/cm²)* |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| <i>Pinus elliottii</i> | 1,051 b | 743 b | 121.778,50 a |
| <i>Eucalyptus grandis</i> | 0,669 a | 480,67 a | 193.679,50 b |
| <i>Araucaria angustifolia</i> | 1,016 b | 530,57 a | 111.636,87 a |
| CV (%) | 5,02 | 11,96 | 16,81 |

* = Letras diferentes entre linhas denotam diferença estatística a 95% de probabilidade pelo teste ANOVA de Scott-Knott; ME = massa específica; MOR = módulo de ruptura; MOE = módulo de elasticidade; CV = coeficiente de variação.

Para o módulo de ruptura apenas a madeira de pinus teve diferença estatística nos resultados, sendo a madeira que obteve maior valor. Para o módulo de elasticidade a madeira de eucalipto foi a que obteve variação significativa e maior valor para a propriedade.

Schneid et al. (2014) verificaram para a madeira de *Araucaria angustifolia* um módulo de elasticidade de 146.502,62 kgf/cm² e módulo de ruptura igual a 447,00 kgf/cm². Bortoleto Junior (2008) obteve valores de 135.826,19 e 448.67 Kgf/cm² para MOE e MOR, respectivamente para a madeira de *Pinus elliottii*. Assim, foi possível observar que nas coníferas o módulo de elasticidade ficou inferior ao analisado na literatura, isto pode ter ocorrido devido à resina de impregnação não possuir elevada elasticidade no ensaio de compressão paralela, ocasionando piora nesta propriedade. Todavia, o módulo de ruptura foi superior aos valores das madeiras sem impregnação, devido à madeira ficar mais rígida.

Diante disto, pode-se verificar que as espécies estudadas apresentaram melhorias em suas propriedades após a impregnação com resina de ésteres de metacrilato, principalmente com relação à resistência mecânica, já que a resina distribui as tensões de forma mais homogênea dentro da madeira em todos os sentidos da mesma.

6 Considerações Finais

Conforme os resultados analisados pode-se avaliar que as madeiras de coníferas obtiveram melhores resultados de impregnação, chegando a praticamente dobrar sua massa específica após o tratamento, devido a suas características anatômicas que foram favoráveis a impregnação. A espécie de *Pinus elliottii* obteve resultados de 7,43% inferior ao da *Araucaria angustifolia* no ganho de massa, devido ao mesmo possuir bolsas de resina em sua estrutura anatômica, dificultando a passagem de resina o que ocasiona que o *Pinus* seja um pouco menos permeável que a *Araucária*. Contudo, a espécie de *Eucalyptus grandis* obteve valor inferior, resultando em um tratamento apenas superficial o que não alterou significativamente na massa específica.

Com relação à retratibilidade não se obteve bons resultados, mostrando que a impregnação com resina à base de ésteres de metacrilato tende a se solubilizar em água, não sofrendo alteração na massa específica e permanecendo semelhante à madeira sem impregnação, podendo até ser mais suscetível a variações dimensionais de contração e inchamento.

Nos testes mecânicos foi possível observar que a madeira impregnada tem ótimos resultados para resistência no teste de dureza janka para as coníferas, alcançando valores considerados elevados. Porém, notou-se que as madeiras de *Pinus* e *Araucária* não obtiveram resultados positivos quanto ao módulo de elasticidade e ao trabalho absorvido nos testes de flexão estática e dinâmica, já que a resina deixa a madeira quebradiça quando exposta a impacto abrupto.

Em geral, pode-se concluir que a impregnação com resina deixou as madeiras mais rígidas e pesadas. Este método de tratamento se torna viável apenas para madeiras com pequenas dimensões, já que o custo da resina é muito elevado, assim não sendo viável a impregnação de madeiras para usos onde o produto final não tenha alto valor agregado. Também vale ressaltar que as madeiras após impregnação não podem ser usadas em locais expostos diretamente a umidade.

Uma vantagem da impregnação com resina, além de melhorar as características mecânicas do material, é a possibilidade de utilizar corantes com o intuito de modificar sua coloração e tornar o material exclusivo, sendo promissora principalmente para utilização na estabilização de blocos de madeira a serem utilizados na cutelaria, ou artefatos de decoração com maior valor agregado.

7 Referências

AGROSOFT. **Pino pátula**. Medellín: Agrosoft Ltda., 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test methods for small clear specimens of timber - ASTM D143-94**. West Conshohocken: 2007, 32p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-143: Standard methods for conducting machining tests of wood and wood base materials**. Philadelphia, 1995, p. 226-245.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2395 – 17. **Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of wood and wood-based materials**. 2017. Recuperado em 24 de outubro de 2021, de <https://www.astm.org/Standards/D2395.htm>.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: projeto de estruturas da madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

BARILLARI, C. T.; FREITAS, V. P. Preservação. **Revista da Madeira**, [S.l.], n.68, dez. 2002.

BELTRAME, R. et al. Propriedades físico-mecânicas da madeira de *Araucaria angustifolia* (bertol.) em três estratos fitossociológicos. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 01, n. 02, p. 54-69, nov. 2010.

BORTOLETO JUNIOR, G. Estudo de algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus merkusii*. **Scientia Forestalis**, v.36, n.79, p.237-243, 2008.

BULIAN, F.; GRAYSTONE, J. A. **Industrial Wood Coatings**. Amsterdam, p.1-135. 2009.

BRAGA, C. **Araucária – Araucaria angustifolia**. Flores e folhagens, 2018. Disponível em: <https://www.floresefolhagens.com.br/araucaria-araucaria-angustifolia/> Acesso em: 28 out. 2021.

CADEMARTORI, P. H. et al. Qualidade da madeira serrada de *Pinus elliotii* Engelm. procedente de florestas resinadas. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 4, p. 577-583, out./dez. 2012.

CALIL NETO, C. **Madeira laminada colada (MLC): controle de qualidade em combinações de espécie-adesivo-tratamento preservativo**. 2011. 123f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CARVALHO, A. et al. Variação dimensional da madeira tratada de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloezian*. **Scientia Agraria Paranaensis – SAP**. Marechal Cândido Rondon, v. 14, n. 3, jul./set., p. 178-182, 2015.

CARVALHO, A. **Estrutura anatômica, propriedades, utilizações**. Escola Superior de Tecnologia de Viseu, Vol. I, Instituto Florestal, 1996. Disponível em: http://www.estv.ipv.pt/PaginasPessoais/jqomarclo/Tim3/tim3_TP1_Na2.pdf Acesso em: 24 Out.. 2021.

CARVALHO, A. **Madeiras portuguesas - estrutura anatômica, propriedades, utilizações**. Vol. 1. Instituto Florestal, 1996, 340 P.

CARVALHO, A. M.; CAMARGO, F. R. A. Variação da densidade básica entre procedências e progênies de *Eucalyptus saligna*. **O Papel**, São Paulo, n.6, p.56-59, 1996.

CHAWLA, K.K. **Composite materials: science and engineering**. 2.ed. New York, Springer Verlag, 1998. 483p.

CRUZ, C. R. et al. Variações dentro das árvores e entre clones das propriedades físicas e mecânicas da madeira de híbridos de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.64, n.1, p.33-47, 2003.

DURLO, M. A. Determinação de variáveis para caracterização de *Pinus elliottii* com finalidade estrutural. In: congresso florestal estadual, v. 6., 1988, Nova Prata. **Anais**. Nova Prata, 1988. p. 1097 - 1113.

DURLO, M. A.; MARCHIORI, J. N. C. **Tecnologia da madeira: retratibilidade**. Santa Maria: CEPEF/FATEC (Série Técnica, 10), Santa Maria, Rio Grande do Sul, 33p. 1992.

ESCORAS de madeira eucalipto. Alisson Lages, 2021. Disponível em: <https://alissonlajes.com.br/escoras-de-madeira-eucalipto/> Acesso em: 29 out. 2021.

EVANS II, J. W. et al. Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature Wood zones. **Forest productions journal**, v. 50, n. 7/8, p. 75-87,2000.

FERNANDES, J. S. et al. Field performance of *Eucalyptus hybrid* sat planalto da conquista, Bahia, Brazil. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, p. 1-8, 2018.

GALLIO, E. et al. Caracterização tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthami* Maiden et Cabbage. **Scientia Agraria Paranaensis**, Marechal Candido Rondon, v. 15, n. 3, p. 244-250, 2016.

GOMES, O.F. **Estudo das ligações cavilhadas impregnadas com resinas estirênicas empregadas em estruturas de madeiras**. São Carlos, 1996. 241p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

HILLIG, E. et al. Propriedades físicas da madeira de *Araucaria angustifolia* (bert.) o. kuntze em função da posição no fuste para diferentes idades. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 257-263, abr./jun. 2012.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura, Rio de Janeiro, v. 35, p. 1-8, 2020.

IPT. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas**. Informações sobre madeiras: *Eucalyptus grandis*. Estado de SP, 2021. Disponível em: http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/13.htm Acesso em: 29 out. 2021.

JUNIOR, P. R. et al. Propriedades físicas e químicas da madeira de *Pinus elliottii* impregnada com sílica. **Scientia Forestalis**, 49(130), e3478, 2021.

KOLLMANN, F. F. P. et al. Principles of wood science and technology. v.2: **Wood Based Materials**. Berlin: Springer – Verlag, 1975.

LARSON, P. R. et al. Formation and properties of juvenile wood in southern pines – a synopsis. Madison: United States Department of Agriculture, Forest Service, **Forest Products Laboratory**, 2001. 42 p.

LATORRACA, J. V. F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**. v. 7, n. 1, p. 279 - 291, jan./dez. 2000.

LEBOW, S. T. Wood Preservation. In: Forest Products Laboratory. Wood handbook: wood as an engineering material. Wisconsin: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, **Forest Products Laboratory**, 2010. Cap. 15, p. 1-44.

LIIBERT, L. et al. **The fixation of new alternative wood protection systems by means of oil treatment**. Mater Sci - Medzg 17, 402-406. 2011.

LIMA, I. L.; GARCIA, J. N. Variação da densidade aparente e resistência à compressão paralela às fibras em função da intensidade de desbaste, adubação e posição radial em *Eucalyptus grandis* Hill ex- maiden1. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.34, n.3, p.551-559, 2010.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Nova Odessa: Plantarum, 1992. 352p

MANRICH, S. **O emprego de madeiras brasileiras na obtenção de compósitos polímero-madeira**. São Carlos, 1984. 184p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos.

MASCARENHAS, A. R. P. et al. Caracterização tecnológica da madeira de espécies de coníferas nativas e exóticas. **Scientific Electronic Archives** | Volume 3 | p. 1-5 | 2013.

MATTOS, B. D. et al. Wood-polymer composites prepared by free radical in situ polymerization of methacrylate monomers into fast-growing pinewood. **Wood Sci Technol** (2015) 49:1281–1294.

MELO, V. M. **Variações nas propriedades da madeira de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes topografias e sujeitos a tempestades**. 2004. 115p.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

MELO, R. R. et al. Caracterização física e mecânica da madeira de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, vol. 5, núm. 1, enero - marzo, 2010, pp. 67-73.

MENDES, L. M. et al. Variação da Densidade da Madeira de Pinus. **Revista da madeira** - edição N° 83 - agosto de 2004.

MEYER, J.A. Industrial use of Wood polymer materials: state of the art. **Forest Products Journal**, v.32, n.1, p.24-29, Jan., 1982.

MOHAMMAD, M. et al. Introduction to cross laminated timber. **Wood Design Focus**, [S.l.], v. 22, n. 2, p. 3-12, verão 2012.

MOREIRA, W. S. **Relações entre propriedades físico-mecânicas, características anatômicas e químicas da madeira**. Imprensa Universitária Ufv, Viçosa-MG, p.1-106, 1999.

MORESCHI, J. C. **Propriedades Tecnológicas da Madeira** – 4ª edição, 208p. Manual Didático, 2014.

MORESCHI, J. C. **Biodegradação e preservação da madeira**. Volume 3, métodos de tratamento da madeira. 2013.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; FILHO, M. T. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.1, p.115-127, 2005.

OLIVEIRA, J. T. S. et al. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, n.5, p.929-936, 2010.

PALERMO, G. P. M. et al. Delimitação entre os lenhos juvenil e adulto de *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v.37, n.1, p.191-200, 2013.

PEDROSO, O; MATTOS, J. R. **Estudo sobre madeiras do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: IPRNR, 1987. 181 p.

PELOZZI, M. M. A. et al. Propriedades físicas dos lenhos juvenil e adulto de *Pinus elliottii* engelm var. *elliottii* e de *Eucalyptus grandis* hill ex maiden. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 2, p. 305-313, abr.-jun., 2012.

PEREIRA, B. L. C. et al. Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.41, n.98, p.217-225, 2013.

PERTUZZATTI, A. et al. Influência da Umidade na Resistência da Madeira de Eucalipto a Impactos. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, p. 1-6, 2017.

PINHEIRO, R. V.; ROCCO, F. A. L. **Influência da preservação química em enciclopédia biosfera**. Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.8, n.15; p. 2012.

RESH, H.; PARKER, R. Heat conditioning veneer blocks. **Research bullentin** 29. 33p. Forest research laboratory, Oregon State University, Corvallis, Oregon. 1979.

SANTINI, E. J; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A. Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de três coníferas de florestas plantadas. **Ciência Florestal**, v.10, n.1, p.85-93, 2000.

SCHNEIDER, M.H.; WITT, A.E. History of wood polymer composite commercialization. **Forest Products Journal**, v.54, n.4, p.19-24, Apr., 2004.

SCHNEID, E. et al. **Estimativa dos módulos de elasticidade e ruptura da madeira de *Araucaria angustifolia* (bertol.) kuntze por meio de método não destrutivo**. I Mostra científica. 2014.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, p. 507-512, 1974.

SEBASTIÃO, C. V. Jr. **Ciência dos polímeros: um teste básico para tecnólogos e engenheiros** -- São Paulo: Artliber Editora, 2ª edição, 2002.

SHIMIZU, J Y. **Pinus na silvicultura brasileira**. 1ª edição, 223p. Portal Ambiente Brasil, 2005.

SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELO, L. E. G. Influência de características anatômicas e químicas sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus spp.* In: Congresso anual de celulose e papel, 24., 1991, São Paulo. **Anais**. São Paulo, ABTCP, 1991. p.178-183.

SIAU, J. F. **Transport processes in wood**. Berlim; Heidelberg; New York: Springerverlag, 1984. 245 p.

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira**. 2002. 181 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2002.

STANGERLIN et al. Qualificação das madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus saligna* através da resistência ao choque. In: XVI congresso de iniciação científica, pesquisa e responsabilidade ambiental. Pelotas, Rio Grande do Sul. **Anais**. 2008. Ufpel, Pelotas Rio Grande do Sul. p.1-5.

SZÜCS, C. A. et al. **Estruturas de Madeira**. Apostila do departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Campos Florianópolis, Versão 3, p. 219, 2015.

TALGATTI, M. et al. **Resistência ao impacto da madeira de *Pinus elliottii***. Seminário De Iniciação Científica E Seminário Integrado De Ensino,

Pesquisa E Extensão. 2015. Recuperado de
<https://unoesc.emnuvens.com.br/siepe/article/view/7982>

VALE AGRÍCOLA. **Como funciona o tratamento de madeira**. 2020. Disponível em:
<https://www.youtube.com/watch?v=z3sQGup7qOM> Acesso em: 30 out, 2021.

VALÉRIO et al. **Determinação da densidade básica da madeira de peroba (*Aspidosperma polineuron* Muell. Arg.) ao longo do fuste**. *Caatinga*, v.21, n.3, p 54-58, 2008.

VIDAURRE, G. B. et al. Physical and mechanical properties of juvenile. *Schizolobium amazonicum* Wood. **Revista Árvore**, 2018. 42(1), e420101.

VIVIAN, A. M. et al. Qualidade do Tratamento Preservativo em Autoclave para a Madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 445-453, dez. 2012.

XAVIER, R.B.L. **Avaliação da dureza janka, densidade e estabilidade de quatro espécies de *Eucalyptus* implantadas no Estado do Rio de Janeiro**. 2008. 31f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Instituto de Florestas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Seropédica, 2008.