

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURA E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA DE ANGELIM SP
OBTIDAS DE ÁRVORES PROVENIENTES DE REGIÕES DISTINTAS DO
PAÍS

JULIA NAVES TEIXEIRA

São Carlos

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA DE ANGELIM
SP OBTIDAS DE ÁRVORES PROVENIENTES DE REGIÕES DISTINTAS DO
PAÍS

JULIA NAVES TEIXEIRA

Defesa de tese de doutorado
apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de São
Carlos, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Doutora
em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. André Luís Christoforo.

São Carlos

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado do candidato Julia Naves Teixeira, realizada em 24/05/2021.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo (UFSCar)

Profa. Dra. Sheyla Mara Baptista Serra (UFSCar)

Prof. Dr. Sérgio Augusto Mello da Silva (UNESP)

Profa. Dra. Cristiane Inácio de Campos (UNESP)

Prof. Dr. Maximiliano dos Anjos Azambuja (FEFEB)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.
O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos pelo apoio. Ao meu bebê, a caminho, que no meio de muitos desafios me trouxe forças para seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor André Luís Christoforo, pela genialidade compartilhada, os conselhos sempre válidos, a compreensão com os percalços no caminho. Por se tornar um exemplo de pesquisador, ético, responsável e respeitoso e me manter acreditando na pesquisa.

Ao Professor Francisco Antônio Rocco Lahr pelos ensinamentos, pela simpatia, acolhimento, apoio e suporte, assim como acompanhamento e incentivo ao desenvolvimento desta pesquisa.

Aos Professores Cristiane Inácio de Campos e Sérgio Augusto Mello da Silva que compuseram a banca de qualificação e defesa e contribuíram muito com suas sugestões. Aos professores Sheyla Mara Baptista Serra e Maximiliano dos Anjos Azambuja pelas contribuições na banca de defesa.

Aos professores do PPGCiv, pelos ensinamentos, conselhos e experiências compartilhadas nesta jornada.

Aos colegas de trabalho, em especial aos também orientados do Prof. André, Vinícius Aquino, Thiago Damasceno e João Paulo Boff, pelo auxílio, dicas e acompanhamentos.

Agradecimentos aos profissionais do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo pelo apoio irrestrito durante a realização dos experimentos.

E de um modo geral a todas as pessoas que sempre estiveram presentes ao meu lado neste período de trabalho intenso.

RESUMO

Atualmente, no Brasil o uso da madeira nas estruturas da construção civil é regulamentado pela norma técnica NBR-7190 (1997) "Projeto de Estruturas de Madeira", da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que não estabelece a possibilidade de influência de regiões de extração nas propriedades da madeira. O objetivo desta pesquisa foi investigar a influência de distintas regiões de extração da madeira de Angelim Pedra em suas propriedades físicas e mecânicas. Nesta pesquisa também foi avaliada, com o auxílio da ANOVA dos modelos de regressão, a possibilidade de se poderem estimar as propriedades de resistência e algumas propriedades físicas da madeira como função da densidade aparente. Conclui-se que os lotes de todas as regiões apresentaram um índice de equivalência elevado, a região de Bonfim apresentou total equivalência e Mucajaí e Claudia apresentaram índice de equivalência igual a 93% em ambas as análises. Quanto a estimativa de propriedades pela densidade aparente observou-se a impossibilidade de estimar propriedades por modelos de regressão. As relações de valores característicos utilizados na caracterização simplificada da madeira encontrada nesta pesquisa foram superiores aos valores dispostos na Norma Brasileira ABNT NBR 7190, demonstra que os resultados obtidos no presente estudo podem ser utilizados em uma nova revisão da Norma sobre as relações utilizadas para caracterização simplificada da madeira.

Palavras-Chave: Madeira; Regiões de extração; Norma Brasileira.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Angelim-pedra (<i>H. petraeum</i>) - (a) Folha da árvore Angelim (b) Tronco de madeira Angelim.	9
Figura 2 - Diagrama tensão x deformação na compressão paralela	23
Figura 3 - Diagrama de carregamento para a determinação da rigidez da madeira à compressão.....	24
Figura 4- Compressão paralela às fibras - (a) Imagem do corpo de prova com os relógios (b) Ensaio	25
Figura 5 - Corpo de prova à compressão normal na prensa	26
Figura 6– Corpo de prova de seção transversal retangular para ensaios de tração paralela às fibras, (a) Vista Frontal e (b) Vista Lateral. Medidas em centímetros.	27
Figura 7– Tração paralela às fibras - (a) Imagem do corpo de prova (b) Ensaio	28
Figura 8- Corpo de prova para o ensaio de tração normal às fibras, vista lateral e corte.	29
Figura 9 – Tração normal às fibras - (a) Imagem do corpo de prova (b) Ensaio	29
Figura 10- Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.	30
Figura 11 – Cisalhamento paralelo às fibras - (a) Imagem do corpo de prova (b) Ensaio	30
Figura 12 - Corpo de prova para ensaio de fendilhamento, vista superior e corte. ...	31
Figura 13 – Fendilhamento paralelo às fibras - (a) Imagem do corpo de prova (b) Ensaio	31
Figura 14- Corpo de prova para a flexão estática.	32
Figura 15 – Flexão estática - (a) Imagem do corpo de prova (b) Ensaio.....	33

Figura 16 - Corpo de prova para o ensaio de dureza Janka. Vista Superior e Corte.	34
Figura 17 - Detalhe esquemático do dispositivo especial para o ensaio de dureza Janka.....	34
Figura 18 – Dureza Janka - (a) Imagem do corpo de prova (b) Ensaio paralelo às fibras (c) Ensaio perpendicular às fibras	34
Figura 19 - Corpo de prova para o ensaio de tenacidade.	35
Figura 20 – Tenacidade e Resistência ao Impacto na Flexão - (a) Corpo de prova posicionado para ensaio (b) Ensaio finalizado	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores médios de algumas propriedades da madeira de Angelim Pedra.	10
Tabela 2– Valores médios das propriedades física e mecânicas da madeira de Angelim Pedra.....	11
Tabela 3– Propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Pedra.....	12
Tabela 4 – Características das regiões e espécies analisadas na pesquisa.....	19
Tabela 5 - Propriedades físicas e mecânicas das madeiras de ANGELIM PEDRA. .	20
Tabela 6 – Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira Angelim-Pedra do Bonfim (Bon)	39
Tabela 7– Propriedades Físicas e Mecânicas da madeira Angelim-Pedra de Mucajaí (Muc)	40
Tabela 8– Propriedades Físicas e Mecânicas da madeira Angelim-Pedra de Cláudia (Cla)	40
Tabela 9 - Resultados dos valores P do Kruskal-Wallis ANOVA.....	42
Tabela 10 - Resultados dos valores P da ANOVA utilizando a técnica Bootstrap.....	43
Tabela 11 - Resultados dos valores P dos Modelos ANOVA de Regressão - Densidade Aparente.....	45
Tabela 12 - Resultados dos valores P dos Modelos de Regressão ANOVA – Resistência a compressão paralela às fibras.	45
Tabela 13 - Relações entre valores característicos - Espécie de madeira Angelim-Pedra.....	47

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos da Pesquisa.....	2
1.1.1 Objetivos específicos.....	2
1.2 Justificativa.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Norma Regulamentadora de Estruturas de Madeira	4
2.2 Exploração de espécies nativas	5
2.3 Amazônia Legal	8
2.4 Breve Histórico – Angelim Pedra	9
2.5 Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira de Angelim Pedra	10
2.6 Estimativa de Propriedades em Função da Densidade Aparente	12
2.7 Influência da Região de Extração	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1 Regiões de extração da madeira	17
3.2 Propriedades Físicas.....	21
3.2.1. Densidade Aparente.....	22
3.2.2. Retração da Madeira	22
3.3. Propriedades Mecânicas	23
3.3.1. Compressão Paralela às Fibras	23

3.3.2. Compressão Normal às Fibras	25
3.3.3. Tração Paralela às Fibras	27
3.3.4. Tração Normal às Fibras	28
3.3.5. Cisalhamento Paralelo às Fibras.....	29
3.3.6. Fendilhamento Paralelo às Fibras.....	31
3.3.7. Flexão Estática	32
3.3.8. Dureza Janka	33
3.3.9. Tenacidade e Resistência ao Impacto na Flexão	35
3.4. Análise Estatística	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira Angelim-Pedra de diferentes locais de extração.....	39
4.2 Resultados de análise estatística	42
4.3 Modelos de Regressão para Estimativas Físicas e Mecânicas	44
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1. INTRODUÇÃO

Em função da disponibilidade e características físico-mecânicas, a madeira foi um dos primeiros materiais a ser utilizado pela humanidade. Mesmo após o aparecimento de materiais sintéticos ela continua a ser empregada como matéria-prima para inúmeros fins (JUVENAL; MATTOS, 2002).

Entretanto, é forte tradição de construção em alvenaria de tijolos de barro presente no Brasil e posteriormente, em concreto armado, foi trazida pelos portugueses desde a colonização do país. Nas regiões com predomínio de colonização de outros povos europeus, como no Sul e Sudeste do país, houve predomínio das construções em madeira. Em 1905, o governo da cidade de Curitiba proibiu a construção de casas de madeira na zona central da cidade, gerando no meio técnico preconceito contra as estruturas de madeira. O uso de técnicas construtivas não apropriadas fez as estruturas de madeira serem sinônimas de pouca durabilidade, paradigma este que deve ser quebrado (MEIRELLES, C. R. M; et al., 2005.).

O Brasil é o país com a maior diversidade de flora de madeira do mundo, tendo 8715 espécies. Possui também o maior número de espécies de árvores endêmicas do mundo, com 4333 espécies. O país possui vasta cobertura vegetal, cobrindo 58% de seu território (493.5 milhões de hectares). Dentre esta área, 10 milhões de hectares são de florestas plantadas demonstrando um grande potencial de uso para este material. (BEECH et al., 2017; SNIF, 2016 - <http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/as-florestas-plantadas>).

O crescente uso de madeira proveniente de espécies arbóreas nativas da região amazônica, juntamente com a complexidade de sua composição e organização, faz necessário o conhecimento da constituição e relações existentes entre os constituintes desse material, de forma que seja possível dar às espécies utilizadas a melhor finalidade, aprimorando o trabalho realizado por madeireiras e marcenarias. Aumentar o conhecimento das propriedades de madeiras nativas pode fazer com que estas substituam espécies que vêm sendo intensamente exploradas pela indústria e que por isso, corram o risco de entrar em extinção (RODRIGUES, SILVEIRA; CASTELLO, 2014).

Atualmente, no Brasil o uso da madeira nas estruturas da construção civil é regulamentado pela norma técnica NBR-7190 (1997) “Projeto de Estruturas de Madeira”, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que estabelece as condições gerais a serem seguidas no projeto, na execução e no controle das estruturas correntes de madeira.

Para as espécies não conhecidas, a ABNT NBR-7190 (1997) permite utilizar a caracterização mínima a partir dos ensaios de compressão e tração paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras e densidades básica e aparente. Neste caso são necessários no mínimo doze corpos de prova por lote de doze metros cúbicos.

Para as espécies usuais a NBR NBR-7190 (1997) permite ainda utilizar a caracterização simplificada, obtendo as propriedades de resistência e rigidez a partir de resultados obtidos da compressão paralela às fibras de no mínimo seis corpos de provas por lote contendo doze metros cúbicos.

Atualmente a norma regulamentadora não prevê ensaios ou determinações de parâmetros para influência da região de extração nas espécies analisadas.

1.1 Objetivos da Pesquisa

O objetivo desta pesquisa foi investigar a influência de distintas regiões de extração nas propriedades físicas e mecânicas, da espécie nativa de madeira Angelim Pedra, extraída de três cidades diferentes, em dois polos madeireiros distintos do país (Boa Vista – RR e Sinop – MT), na área da Amazônia Legal. Tal estudo da sequência em análise de comprovação de linha de pesquisa com o tema, onde o objetivo é avaliar a necessidade de revisão da norma técnica que regulamenta o uso de madeira como material de construção civil no Brasil, a NBR 7190/1997, para parâmetros mais ajustados de cálculo e aplicação das espécies nativas do país.

1.1.1 Objetivos específicos

A pesquisa fez uma caracterização completa, para madeiras desconhecidas, para espécie de Angelim Pedra, seguindo todas as diretrizes da norma NBR 7190/1997.

Conhecidas às propriedades da madeira para uma das regiões de extração, investigou-se se a média de uma determinada propriedade é equivalente à média da mesma propriedade para as madeiras das regiões em conjunto.

Além da investigação da influência das regiões de extração nas propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Pedra, nesta pesquisa também foi avaliada, com o auxílio da ANOVA dos modelos de regressão, a possibilidade de se poder estimar as propriedades de resistência, de rigidez e algumas propriedades físicas da madeira como função da densidade aparente.

1.2 Justificativa

As diferentes condições do clima, da vegetação e do solo das áreas de cobertura vegetal do país, podem influenciar no desenvolvimento da árvore e conseqüentemente nos valores das propriedades físicas e mecânicas da madeira. É comum um mesmo lote de madeira comercializada conter peças provenientes de diferentes regiões de extração e, portanto, é relevante que se tenham informações confiáveis sobre a influência nos valores de suas propriedades (AQUINO, 2019).

Considerando que o número de ensaios para a determinação das propriedades de resistência e de rigidez da madeira é elevado e que podem influenciar de modo significativo na composição do custo de comercialização deste material, é importante que se determine modelos matemáticos de bons ajustes que permitam estimar as propriedades de resistência e de rigidez da madeira em função de sua densidade, isto permitirá ao projetista elaborar um pré-dimensionamento da estrutura mais preciso e confiável.

A NBR 7190 (1990) não fixa uma diretriz específica que considere as possíveis influências nas resistências e rigidezes das madeiras de mesma espécie provenientes de diferentes áreas de extração, nem as relações para estimar suas propriedades de resistência e de rigidez em função da densidade aparente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Norma Regulamentadora de Estruturas de Madeira

A norma ABNT NBR-7190 (1997), vigente é pautada nos métodos probabilísticos de Estados Limites, Método dos Estados Limites Último, que avalia a capacidade resistente à ruptura e à instabilidade no todo ou em parte da estrutura, e Método dos Estados Limites de Utilização, que avalia a deformação excessiva e a durabilidade no todo ou em parte da estrutura.

Além dos quesitos sobre arranjo estrutural, ações atuantes, modelo e análise estruturais, critérios relativos ao dimensionamento, e detalhamento das estruturas e elementos de ligação, a norma também determina métodos específicos para a obtenção das propriedades físicas e mecânicas das madeiras.

Pela sua estrutura anatômica a madeira deve ser caracterizada levando-se em conta o tipo de esforço (tração, compressão e cisalhamento); direção das fibras (paralela e normal); classes de umidade (12%) (CHRISTOFORO et al., 2016).

No dimensionamento das estruturas de madeira, a norma ABNT NBR-7190 (1997) específica, para a determinação das propriedades de resistência e de rigidez, os métodos de caracterização completa, mínima ou simplificada.

Para a caracterização completa de uma espécie a norma prescreve que sejam ensaiados doze corpos de prova por lote com doze metros cúbicos de madeira, considerando classe de umidade referente à umidade de equilíbrio (U_{eq}) da madeira de 12%. As propriedades físicas e mecânicas exigidas para a caracterização completa da madeira são: resistências na compressão e na tração paralelas às fibras, na compressão e na tração normal às fibras, no cisalhamento paralelo às fibras, no embutimento paralelo e normal às fibras, e nas densidades básica e aparente, ressaltando a existência de várias outras propriedades que podem ser determinadas experimentalmente.

Quanto à rigidez, a norma brasileira especifica que as propriedades sejam determinadas por métodos de caracterização completo ou simplificado. A caracterização completa da rigidez se faz sempre na condição padrão de umidade (12%), resultando nos valores médios dos módulos de elasticidade na compressão (E_{c0}) e na tração (E_{t0}) paralela às fibras com no mínimo dois ensaios por

caracterização, admitido o mesmo módulo de elasticidade à compressão e à tração ($E_{c0} = E_{t0}$) para o cálculo das estruturas.

A norma ABNT NBR 7190 (1997) também recomenda que se o lote a ser caracterizado por qualquer dos métodos, completo, mínimo ou simplificado, apresentar umidade contida no intervalo entre 10% e 20%, todos os resultados apresentados devem ser corrigidos para a umidade padrão 12% e classe de umidade 1.

A norma Brasileira apresenta em seu Anexo E valores médios de algumas propriedades (uma física e cinco mecânicas) de resistência e de rigidez para cinquenta espécies de madeira nativas e de reflorestamento, entretanto, não faz menção à diferença existente nas propriedades físicas e mecânicas para uma mesma espécie em função do local ou da região de extração das árvores, e como valores base para o pré-dimensionamento estrutural, esses podem apresentar diferenças significativas e que podem conduzir a valores significativamente diferentes dos valores das propriedades de resistência e de rigidez da madeira a ser utilizada no projeto, requerendo na caracterização da espécie, o uso de madeiras de regiões distintas (ROCCO et al., 2016).

2.2 Exploração de espécies nativas

Madeiras com resistências químicas e biológicas nativas são chamadas de madeira de lei. A expressão madeira de lei tem origem em uma lei do período Colonial em que madeiras destinadas a construção naval era protegidas por lei, ou “ordenações do reino” e por decretos dos governadores. Apesar do termo ser muito utilizado no Brasil, não existe uma definição técnica. Esta expressão é ainda hoje sinônimo da madeira de construção, civil e naval, ou seja, conforme o dicionário Aurélio: "madeira dura ou rija, própria para construções e trabalhos expostos às intempéries". De modo geral, pode-se dizer que madeira de lei é um material resistente utilizado para a construção civil e outras áreas, apresentando baixa suscetibilidade ao ataque de organismos xilófagos (fungos, bactérias e cupins) (OLIVEIRA, 2011).

Na Amazônia, a maior riqueza de espécies de árvores nativas é relatada em sua porção oeste onde Gentry (1988) e Valencia et al. (1994) registraram 283 e 307 espécies respectivamente. A relativamente alta pluviosidade e solos mais ricos em

nutrientes da Amazônia ocidental foram citados como possíveis fatores contribuintes para esta alta riqueza de espécies de árvores (Gentry 1982, 1988).

Tem crescido enormemente a preocupação com a conservação das florestas tropicais, pois elas vêm desaparecendo, em todo o mundo, à taxa assustadora de mais de 46.000 hectares por dia. Grande parte desse desaparecimento se deve à agricultura itinerante, à formação de pastagens, e à atividade madeireira, tida como principal causa do desmatamento incontrolado ocorrido nos trópicos (SILVA, 1996).

Segundo Almeida et al. (1993) e Valencia et al. (1994) a perturbação maciça na Amazônia é frequentemente seguida pelo estabelecimento de cortes de pioneiros, como espécies de *Cecropia* que dominam a estrutura da floresta e composição por anos após a perturbação, reduzindo assim a diversidade. Embora saibamos que o fogo teve um impacto na parcela de estudo de 100 hectares (Bassini e Becker 1990; Piperno e Becker 1996).

As causas históricas e presentes do desmatamento na Amazônia são diversas e frequentemente inter-relacionadas. Compreendem desde incentivos fiscais (Mahar, 1988; Schmink e Wood, 1992; Moran, 1993) e políticas de colonização no passado (Hecht, 1985; Hecht e Cockburn, 1990; Schmink e Wood, 1992; Andersen e Reis, 1997; Laurance, 1999), as quais desencadearam uma forte migração para Amazônia como válvula de escape para os problemas sociais de outras regiões (Skole et al., 1994); recorrentes conflitos fundiários motivados pela ausência de titularidade da terra e pela pressão da reforma agrária (Fearnside, 1985 e 2001; Soares-Filho et al., 2004); até o recente cenário macroeconômico (Margulis, 2002), envolvendo o avanço da exploração madeireira (Nepstad et al., 2001), da pecuária (Mertens et al., 2002; Kaimowitz et al., 2004) e o aumento exponencial do agronegócio, notadamente a expansão das culturas de soja sobre áreas de pastagens (Alencar et al., 2004a). Investimentos em infra-estrutura, sobretudo a abertura de estradas e pavimentação (Nepstad et al., 2000; Carvalho et al., 2001; Laurance et al., 2001), completam esse quadro, posto que promovem a viabilidade econômica da agricultura e da exploração madeireira na Amazônia central, com conseqüente valorização de suas terras.

Experiências recentes em planejamento regional (Alencar *et al.*, 2004b), zoneamento agro-ecológico (Sectma, 2000) e fiscalização ambiental (Fema, 2002) devem ser refinadas e multiplicadas para que consigamos sobrepujar as crescentes forças de exploração da floresta. Mas somente a presença da lei não basta, pois há,

igualmente, necessidade de se valorizar a floresta em pé, buscando-se economias florestais, calcadas em uma sólida base macroeconômica, que sejam competitivas em face dos usos atuais em áreas convertidas, como a criação de gado e a plantação de grãos (SOARES- FILHO et al, 2005).

A alternativa quanto a exploração de espécies nativas, é o termo manejo florestal, ou manejo auto-sustentado, ou ainda manejo sustentado, usado há décadas no Brasil, nem sempre tem sido bem entendido. Manejo florestal é classicamente definido como aplicação de métodos empresariais e princípios técnicos na operação de uma propriedade florestal. Entre os princípios técnicos está a silvicultura como parte integrante do manejo. A silvicultura deve ser entendida como a parte da ciência florestal que trata do estabelecimento, condução e colheita de árvores (SILVA, 1996).

Esse conceito, que à primeira vista parece referir-se somente a florestas plantadas, aplica-se também a florestas naturais e regulamentou a exploração das florestas da Bacia Amazônica (Decreto nº 1.282, de 19.10.95). Neste documento, o termo manejo florestal sustentável é definido como administração de floresta para a obtenção de benefícios econômicos e sociais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema. Esta definição deixa claro que para ser sustentável, o manejo deve ser economicamente viável, ecologicamente correto e socialmente justo (SILVA, 1996).

O bom manejo inclui uma exploração cuidadosa (de baixo impacto ambiental), a aplicação de tratamentos silviculturais à floresta para regenerar e fazer crescer outra colheita, e o monitoramento, para ajudar o manejador na tomada de decisões técnicas e administrativas (SILVA, 1996).

O Fundo Amazônia é um instrumento do governo Brasileiro para combater o intenso desmatamento no Bioma Amazônia, além de promover a conservação e o manejo sustentável das florestas, fato este comprovado pelos vários projetos apresentados ao BNDES, além de cinco projetos já terem sido aprovados, contribuindo assim, direta ou indiretamente, para redução do desmatamento no Bioma Amazônia. O Fundo Amazônia é uma das medidas da Amazônia Legal (LEMOS, SILVA, 2012)

2.3 Amazônia Legal

A Amazônia Legal é o território compreendido pelos Estados do Acre, Pará, Amazonas, Roraima, Rondônia, Amapá e Mato Grosso e pelas regiões situadas ao norte do paralelo 13° S do Estado de Tocantins, e a oeste do meridiano 44° W do Estado do Maranhão, totalizando uma área de 5.114.798,30 km², sendo que, deste total, o que representa o Bioma Amazônia é aproximadamente de 4.221.420,81 km² (LEMOS, SILVA, 2012).

No Brasil, as mudanças de uso do solo na Amazônia Legal constituem um exemplo importante de ascensão de uma questão à agenda política. A Floresta Amazônica é caracterizada por uma enorme diversidade de ambientes, com mais de 600 tipos diferentes de habitats terrestres e de água doce, que abriga rica biodiversidade: cerca de 45 mil espécies de plantas e vertebrados conhecidos, o que corresponde aproximadamente a ¼ das espécies terrestres globais. A evaporação e a condensação de vapor de água na Floresta Amazônica são motores da circulação atmosférica global, tendo efeitos nas precipitações ao longo da América do Sul e outras regiões (CAPELLA, 2006; BRASIL, 2012; MALHI, 2008).

Em junho de 2003, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) divulgou dados relativos ao desmatamento na Amazônia Legal no período de 31 de julho de 2001 a 1.º agosto de 2002, indicando um crescimento acelerado do desmatamento em torno de 40% em relação ao ano anterior. Crescentes taxas de desmatamento reconhecidamente ocasionam o desequilíbrio dos serviços ecossistêmicos florestais, acarretando graves impactos ambientais e socioeconômicos. Diante da ameaça de continuidade da tendência de aumentos expressivos nas taxas de desmatamento na Amazônia Legal, a questão das mudanças de uso do solo na região foi reconhecida como um problema para o qual o governo deveria apresentar soluções (PPCDAm, 2004).

Segundo Ambiente Brasil (2010), desmatamento é a operação que objetiva a supressão total da vegetação nativa de determinada área para o uso alternativo do solo, ou seja, qualquer descaracterização que venha a suprimir toda vegetação nativa de uma determinada área deve ser interpretada como desmatamento. A ocupação e o desmatamento na Amazônia intensificaram-se no início da década de 1970, principalmente pelos agricultores e pecuaristas do sul e sudeste, em consequência da

preocupação dos governos militares com a possibilidade de internacionalização da Amazônia.

Barbosa et al. (2008) relatam que os municípios mais afetados pelo desmatamento estão ligados, principalmente, às primeiras áreas de colonização em Roraima (Mucajaí e Cantá) e aos planos de desenvolvimento e assentamento humano implementados pelos governos militares entre as décadas de 1970 e 1980 (Rorainópolis). Estes municípios, além de Bonfim e Caroebe, apresentam mais de 17% das florestas desmatadas do Estado.

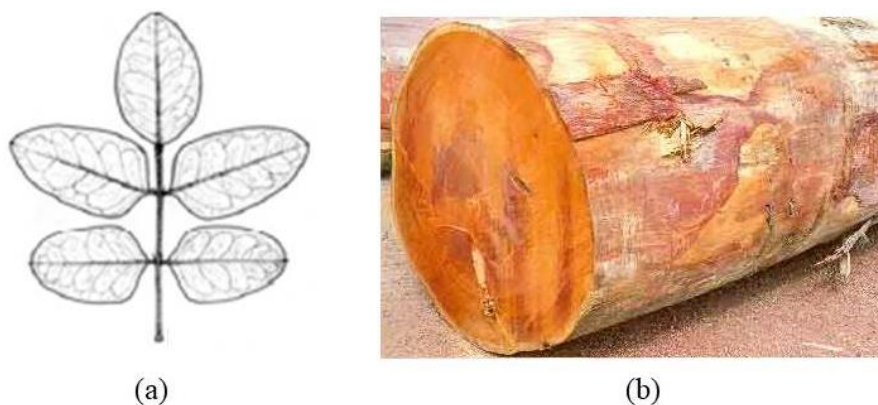
O Bioma Amazônia no Mato Grosso corresponde a uma área de 489.675 km², ou seja, aproximadamente 54% da área do Estado. O desmatamento médio anual do Estado é de 6.300 km², valor este responsável pela maior taxa de desmatamento da Amazônia Legal (LEMOS, SILVA, 2012). As zonas da Amazônia legal citadas acima, são áreas onde há incidência da madeira Angelim Pedra e são local de extração para o estudo desta pesquisa.

2.4 Breve Histórico – Angelim Pedra

Com a possibilidade de manejo de florestas nativas e frente à necessidade de diversificação do uso de espécies na construção civil a madeira de Angelim Pedra se apresenta como solução alternativa, pois é uma espécie de madeira que se desenvolve em um habitat de matas de terra firme e é encontrada com abundância em uma vasta região da Amazônia meridional (RODRIGUES, SILVEIRA; CASTELLO, 2014).

Conhecida popularmente como Angelim Pedra (Figura1), a espécie arbórea tem cerca de 55 m de estatura e 2 m de diâmetro, (FERREIRA; GOMES; HOPKINS, 2004), apresenta elevado valor comercial, sendo muito utilizada no ramo moveleiro, carpintaria e construção civil (RIBEIRO et al., 1999). Apesar de sua importância, estudos sobre a morfologia e resistência desta espécie são incipientes na literatura, sabe-se que a temperatura para da espécie é entre 15 e 35 °C para germinar (OLIVEIRA et al., 2010).

Figura 1 – Angelim-pedra (*H. petraeum*) - (a) Folha da árvore Angelim (b) Tronco de madeira Angelim.



Fonte: Oliveira *et al.* (2010).

No Brasil os estados de maior incidência são Amapá (AP), Amazonas (AM), Pará (PA) e Rondônia (RO) (CORRÊA, 1984). Angelim Pedra (*H. Petraeum*) é uma árvore de grande porte que apresenta densidade aparente ($\rho_{ap,12\%} = 694 \text{ kg/m}^3$), tronco reto e cilíndrico (OLIVEIRA, 2010). Conforme norma brasileira ABNT NBR-7190, 1997, a madeira de Angelim Pedra é classificada como madeira pesada e com propriedades de resistência e rigidez adequadas ao uso estrutural. Na indústria madeireira é utilizada para construção por sua alta durabilidade natural e resistência ao ataque de cupins, fungos e outros parasitas da madeira (IPT, 2018).

2.5 Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira de Angelim Pedra

A norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) em seu Anexo E apresenta os valores da densidade aparente ($\rho_{ap,12\%}$), da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), da resistência à tração na direção paralela às fibras (f_{t0}), da resistência à tração na direção normal às fibras (f_{t90}), da resistência ao cisalhamento (f_v) e do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}) da madeira de Angelim Pedra, cujos valores médios, obtidos para um número de 39 amostras são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores médios de algumas propriedades da madeira de Angelim Pedra.

$\rho_{ap,12\%}$	f_{c0}	f_{t0}	f_{t90}	f_v	E_{c0}
(kg/m^3)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
694	59,8	75,5	3,5	8,8	12912

Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Rodriguez, Silveira e Castello (2014) avaliaram propriedades de resistência e de rigidez da madeira de Roxinho (*Peltogyne lecointei Ducke*), Cedrinho (*Erismia uncinatum Willd*), Jatobá (*Hymenaea courbaril L.*) Angelim Pedra (*Hymenolobium petraeum Ducke*) e Amescla (*Trattinnickia burseraefolia*). As árvores foram selecionadas pelo aspecto visual do fuste, foram abatidas três árvores representativas de uma população por cada espécie. De cada árvore selecionada foram medidos os valores de diâmetro à altura do peito (DAP) (estabelecido a 1,3m em relação ao solo), altura total (Ht) e altura comercial (Hc). A altura comercial foi considerada aquela em que o diâmetro mínimo era de 8 cm. O tronco foi seccionado em comprimentos equivalentes nas posições de 0% de altura (base da árvore), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial. Os valores das propriedades física (densidade aparente obtidas das amostras) e mecânicas da madeira de Angelim Pedra são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2– Valores médios das propriedades física e mecânicas da madeira de Angelim Pedra.

Amostra				
$\rho_{ap,12\%}$	f_{c0}	F_{v0}	E_M	f_M
(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
590	51,97	11,16	11498	109,98

Fonte: Rodriguez, Silveira e Castello (2014).

Segundo o Catálogo de Madeiras Brasileiras para a Construção Civil (2013), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), a madeira de Angelim Pedra (*Hymenolobium petraeum Ducke*), conhecida também por angelim, angelim-amarelo, angelim-da-mata, angelim-do-pará, angelim-macho, mirarema, entre outras, é madeira que pode ser encontrada na região Amazônica: Amazônia, Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia. É uma espécie que apresenta alta resistência ao ataque de organismos xilófagos (fungos e cupins), o cerne é difícil de preservar e o alburno é muito fácil de preservar, em processo sob pressão, tanto com creosoto (oleossolúvel) como CCA (hidrossolúvel), é de fácil trabalhabilidade tanto com ferramentas manuais como máquinas, e de secagem muito rápida em estufa, apresentando pequena tendência a torcimento e arqueamento, a secagem ao ar livre é moderadamente difícil. As propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Pedra são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3– Propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Pedra.

Densidade aparente a 12% de umidade	710 kg/m ³
Densidade básica (massa seca da amostra / volume saturado)	950 kg/m ³
Retratibilidade radial	4,1%
Retratibilidade tangencial	6,3%
Retratibilidade volumétrica	10,1%
Resistência na flexão estática (madeira verde)	70,60 MPa
Resistência na flexão estática (madeira com 12% de umidade)	109,30 MPa
Módulo de elasticidade na flexão estática (madeira verde)	9414MPa
Resistência na compressão paralela às fibras (madeira verde)	38,00 MPa
Resistência na compressão paralela às fibras (madeira com 12% de umidade)	52,30 MPa
Resistência a compressão perpendicular às fibras (madeira verde)	6,4 MPa
Resistência a compressão perpendicular às fibras (madeira com 12% de umidade)	11,30 MPa
Dureza Janka paralela às fibras (madeira com 12% de umidade)	7659 N
Resistência ao cisalhamento (madeira verde)	10,00 MPa
Resistência ao cisalhamento (madeira com 12% de umidade)	12,30 MPa

Fonte: Catálogo de Madeiras Brasileiras para a Construção Civil (2013).

2.6 Estimativa de Propriedades em Função da Densidade Aparente

Dentre as propriedades da madeira, a densidade se apresenta como a mais relevante e de fácil determinação experimental. Hellmeister (1982) afirmou que madeiras com maior densidade apresentam maior resistência e maior rigidez, pois possuem maior quantidade de massa por unidade de volume. Já Shimoyama e Barrichelo (1991) e Humphreys e Chimelo (1992) afirmaram que todas as demais propriedades das madeiras estão de certa forma associadas à sua densidade, diferentemente do que ocorre com o concreto e o aço, que possuem densidade constante para diferentes resistências.

Segundo Oliveira (1997), a densidade das madeiras é determinada de duas formas, a densidade básica, que relaciona a massa seca com o volume saturado da amostra, e a densidade aparente, que relaciona a massa e o volume ambos no valor

referência de 12%, que é a de maior interesse do ponto de vista prático para a determinação das relações entre propriedade mecânicas e densidade.

Seguindo a ideia da estimativa de propriedades apresentada pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) e sabido da relevância da densidade (frente a outras propriedades da madeira) assim como da relativa facilidade na sua determinação, a estimativa (via modelos matemáticos de regressão) de propriedades de resistência e de rigidez da madeira em função da densidade se apresenta como uma alternativa (DIAS e LAHR, 2004; CHRISTOFORO et al., 2014). Encontrado um bom ajuste (considerando várias amostras de uma mesma espécie de madeira e provenientes de regiões distintas do país) e determinada a densidade da madeira, os modelos que estabelecem a relação entre as propriedades de resistência e de rigidez da madeira com a densidade possibilitarão ao projetista um pré-dimensionamento mais preciso e de maior confiabilidade.

Dias e Lahr (2004) também investigaram, com o auxílio de modelos de regressão testados (linear, logaritmo, polinômio de grau 2, potência, exponencial) a possibilidade da estimativa de propriedades físicas e mecânicas em função da densidade aparente, considerando-se para tanto um conjunto de resultados formado por 40 espécies de madeira. Os resultados dos coeficientes de determinação (R^2) obtidos das estimativas das propriedades de resistência e de rigidez (com exceção da resistência ao fendilhamento – f_{s0}) em função da densidade aparente variaram no intervalo de 62,77% a 92,24%, e o modelo exponencial mostrou ser o de melhor ajuste. O mesmo não ocorreu com relação às propriedades físicas e com a resistência ao fendilhamento das madeiras, cujos valores dos coeficientes de determinação, obtidos com o uso do modelo polinomial quadrático (melhor ajuste), variaram no intervalo de 13,90% a 18,70%.

Christoforo et al. (2014) avalia a possibilidade da estimativa da tenacidade em função da densidade aparente e da resistência na flexão estática de 15 espécies de madeira igualmente divididas nas classes de resistência C20 (Cedro Doce, Cedrona, Quarubarana), C30 (Canafístula, Cedro Amargo, Cupiúba), C40 (Branquilha, Cafearana, Louro Preto), C50 (Castelo, Angico Preto, Catanudo) e C60 (Garapa, Champanhe, Sucupira) da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) para o grupo da folhosas. Os modelos de regressão utilizados foram os polinomiais linear, quadrático e cúbico, todos avaliados pela análise de variância (ANOVA). Todos os ajustes

testados foram considerados significativos pela ANOVA. Para a tenacidade em função da densidade aparente, o melhor modelo obtido foi o polinomial quadrático, que forneceu valor do coeficiente de determinação de 67,80%, e para a estimativa da tenacidade em função da resistência na flexão estática, o melhor ajuste também foi o polinomial quadrático, que forneceu valor do coeficiente de determinação de 58,70%. Pelos resultados obtidos, os autores concluem ser possível a estimativa da tenacidade das madeiras em função densidade aparente.

Almeida et al. (2015) avaliaram a correlação entre a densidade seca (ρ_0) e o Coeficiente de Retratibilidade Volumétrica (CRV) para as madeiras de *Cedrella* sp., *Cassia ferruginea* e *Vataireopsis araroba* separadamente assim como da análise da correlação do conjunto envolvendo as três espécies de madeira. Os resultados do coeficiente de correlação linear de Pearson entre a densidade seca e o coeficiente de retratibilidade volumétrica para cada espécie foram considerados não significativos, entretanto, houve correlação significativa considerando o conjunto com as três espécies, e para tanto, o modelo de regressão gerado ($CRV=0,119+0,566 \cdot \rho_0$) forneceu um valor do coeficiente de determinação de 52%. Para resultados mais contundentes, os autores sugerem o desenvolvimento de novas pesquisas.

Almeida et al. (2016a) avaliaram a possibilidade do uso da densidade aparente ($\rho_{ap,12\%}$) como estimador da resistência na compressão paralela (f_{c0}) das madeiras de Canafístula (*Cassia ferruginea*); Cupiúba Araroba (*Vataireopsis araroba*) e Castelo (*Gossypiospermum* sp.), pertencentes as classes de resistência C30, C40 e C60 da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997). Os modelos de regressão utilizados consistiram no linear, exponencial, logarítmico e geométrico, todos fundamentados na análise de variância. Para as madeiras de Canafístula e de Castelo, os melhores ajustes obtidos foram os geométricos, que resultaram em coeficiente de determinação (R^2) de 48,57% e 52,84%, respectivamente. Para o conjunto com as três espécies, o melhor modelo obtido foi o linear, entretanto, que resultou em valor do coeficiente de determinação de apenas 17,88%. Os autores concluem que a densidade não se apresenta como bom estimador da resistência na compressão paralela das madeiras investigadas.

Christoforo et al. (2016) avalia a possibilidade da estimativa da retratibilidade (radial, tangencial, volumétrica) em função da densidade aparente considerando as espécies de madeira Cedro Doce (*Cedrela* sp.), Canafístula (*Cassia ferruginea*),

Angelim Pedra Araroba (*Vatairea opsisararoba*), Mandioqueira (*Qualea* sp.) e Angelim Pedra Vermelho (*Dinizia excelsa*), pertencentes as classes de resistência (classificadas pela resistência a compressão paralela às fibras, $f_{c0,k}$) C20, C30, C40, C50 e C60, respectivamente (ABNT NBR 7190, 1997). Os autores utilizaram modelos de regressão polinomiais linear, quadrático e cúbico e também ajustes exponenciais, ambos fundamentados na análise de variância (ANOVA) dos modelos de regressão. Para o conjunto envolvendo todas as espécies de madeira, os melhores ajustes foram provenientes das retrações tangenciais e volumétricas, ambos com o uso do modelo exponencial, justificados pelos maiores valores dos coeficientes de determinação obtidos, sendo 51,20% para a estimativa da retratibilidade tangencial e de 54,60% para a estimativa da retratibilidade volumétrica.

2.7 Influência da Região de Extração

Observando que as reservas naturais das espécies desenvolvidas nas florestas tropicais, e aí se encontra a espécie Angelim Pedra, ocupam uma área geográfica de extensão significativa e, portanto, passíveis de serem encontradas variações importantes nas propriedades estudadas, sendo assim, há que se considerar a possibilidade de lotes específicos retirados de uma das regiões apresentarem resultados significativamente diferentes para as mesmas propriedades, neste caso as conclusões devem ser cautelosas, pois podem não representar fielmente o universo da reserva (OLIVEIRA, 2010).

A influência da região de extração (Municípios de Caracará e Bonfim em Roraima; Município de Alta Floresta em Mato Grosso) nas três propriedades físicas e doze propriedades mecânicas da madeira da espécie Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*) e dos teores de umidade a 12% e saturada, foram investigadas no trabalho de Lahr et al. (2016). Os autores concluíram não ser significativa a influência da região de extração das madeiras na determinação das suas propriedades físicas e mecânicas, e com relação ao teor de umidade, quando considerado significativo pela análise de variância, os valores de resistência e de rigidez sofreram reduções com o aumento do teor de umidade de 12% para saturada.

A influência da região de extração da madeira Cambará foi pesquisada por Aquino, (2019), com auxílio da análise de Variância de Kruskal-Wallis (ANOVA) e a técnica bootstrap de reagrupamento foram analisadas amostras extraídas de três

locais distintos: Vera, Mucajaí e Sul de Rondônia. Os resultados da ANOVA indicaram índice de equivalência igual a 100% para as propriedades da região de Vera, 94% para as regiões de Mucajaí e Sul de Rondônia. A técnica de reamostragem levou a resultados semelhantes para as regiões de Vera e Mucajaí e para a região Sul de Rondônia, o índice de equivalência foi igual a 89%, concluiu-se que não há influência da região de extração nas propriedades da espécie analisada (AQUINO, 2019).

Da Silva (2018) investigou a influência da região de extração da madeira Cupiúba (*Goupia Glabra Aubl*) por análise de Variância de Kruskal-Wallis (ANOVA) e da técnica bootstrap de reagrupamento, extraída das regiões de extração Caracaraí, Bonfim e Cláudia. Os resultados da ANOVA indicaram equivalência em 94% das propriedades das regiões de Caracaraí e Cláudia, e não equivalência em 50% das propriedades da região de Bonfim, e mesmo depois de extrapolados pela técnica bootstrap, apresentou não equivalência em 44% das propriedades (DA SILVA, 2018).

A variação da densidade da madeira e propriedades mecânicas com o local, árvore e dentro da árvore (longitudinal e radial) foram estudados para pau-preto (*Acacia melanoxylon* R. Br.) cultivado em quatro locais em Portugal. Vinte árvores foram selecionadas aleatoriamente e testadas quanto à densidade ao ar seco com teor de umidade de 12%, resistência à flexão (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e resistência à compressão paralela às fibras, usando os padrões ISO. O local não foi uma fonte significativa de variação para todas as propriedades de madeira. A variação entre as árvores individuais era a mais importante. Dentro da árvore, a variação radial foi altamente significativa para todas as características, enquanto a variação longitudinal foi significativa apenas para a densidade (MACHADO et al, 2014).

O efeito da origem da semente no crescimento anual, nas propriedades físico-mecânicas e nas características anatômicas da madeira de *Balfourodendron riedelianum* em um plantio homogêneo (LAES) de três procedências (Gália e Bauru no Estado de São Paulo e Alvorada do Sul no Estado do Paraná, Brasil). Como a informação genotípica é um determinante da formação da madeira, esperava-se que as árvores desenvolvessem uma estrutura de madeira com base na genética de sua proveniência. Os resultados do estudo mostram que as variações de volume, propriedades e anatomia da madeira foram influenciadas pela origem. As árvores de Alvorada do Sul apresentaram menor crescimento em volume e, portanto, maior

resistência e homogeneidade, em comparação com Gália e Bauru (ASSAD et al, 2020).

Cabe destacar que as pesquisas citadas nesta revisão demonstram resultados distintos, onde para determinadas espécies a região de extração teve influência nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, tal estudo se apresenta importante visto a variabilidade na fonte de proveniência das madeiras fornecidas pelas empresas do ramo, o que não é discutido pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), e que se apresenta como possível tema para projeto de pesquisa futuro, permitindo o estudo de um número maior de regiões de extração na determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa classifica-se como quantitativa pelo tratamento dos dados primários de ensaios de propriedades físicas e mecânicas assim como análises estatísticas. É qualitativa por analisar a influência das regiões de extração nestas propriedades, dando sequência e validando uma linha de pesquisa que visa a possibilidade de revisão da norma 7190/1997.

3.1 Regiões de extração da madeira

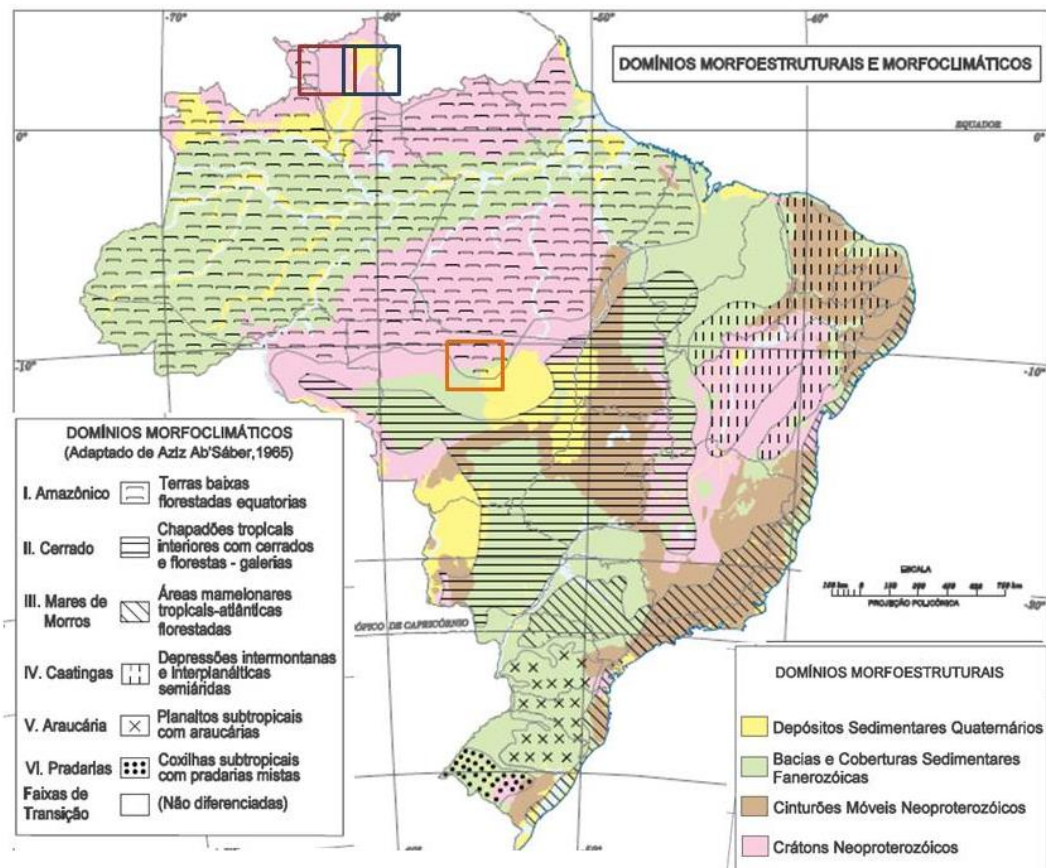
Quanto à classificação climática, das regiões das cidades da pesquisa, Bonfim (RR), Mucajaí (RR) e Cláudia (MT) são classificadas por Álvares *et. al.* (2014) como Aw (clima tropical com estação seca de Inverno). Segundo o autor, o limite do clima Aw no Brasil está localizado em um local isolado nas terras altas de Roraima e no estado de Mato Grosso o clima Aw vem do sul com precipitação anual 1.400 mm (região do Pantanal) e passa pelo centro do estado, onde as chuvas anuais totais variam de 1.800 a 2.300 mm, sendo assim os locais mais chuvosos do clima Aw no Brasil.

A classificação climática de Köppen é um sistema amplamente utilizado por critérios geográficos e climatológicos, sociedades em todo o mundo, com regras simples e letras de símbolos climáticos bem reconhecidos (ALVARES *et al.*, 2014). Atualmente, muitos pesquisadores usaram o Köppen classificação climática como base para estudos em agroclimática zoneamento no Brasil (JURCA, 2005), no auxílio

ao zoneamento de espécies florestais (ARAÚJO et al., 2012), e também em zoneamento climático das plantações de *eucalipto* em todo o Brasil (GONÇALVES et al., 2013).

Quanto ao relevo (Figura 2) das regiões de extração das espécies analisadas, usando como referência os dados divulgados pelo IBGE (2006), temos similaridade quanto ao relevo das cidades de Mucajaí (RR) e Cláudia (MT) estão em uma zona de transição em Crátons Neoproterozóicos, que são planaltos residuais, chapadas e depressões interplanálticas, tendo como embasamento metamorfitos e granitóides associados e incluindo como cobertura rochas sedimentares e/ou vulcano-plutonismo, deformados ou não. A cidade de Bonfim (RR), está sobre Depósitos Sedimentares Quaternários – Esse domínio é constituído pelas áreas de acumulação representadas pelas planícies e terraços de baixa declividade e, eventualmente, depressões modeladas sobre depósitos de sedimentos horizontais a sub-horizontais de ambientes fluviais, marinhos, fluviomarinhos, lagunares e/ou eólicos, dispostos na zona costeira ou no interior do continente.

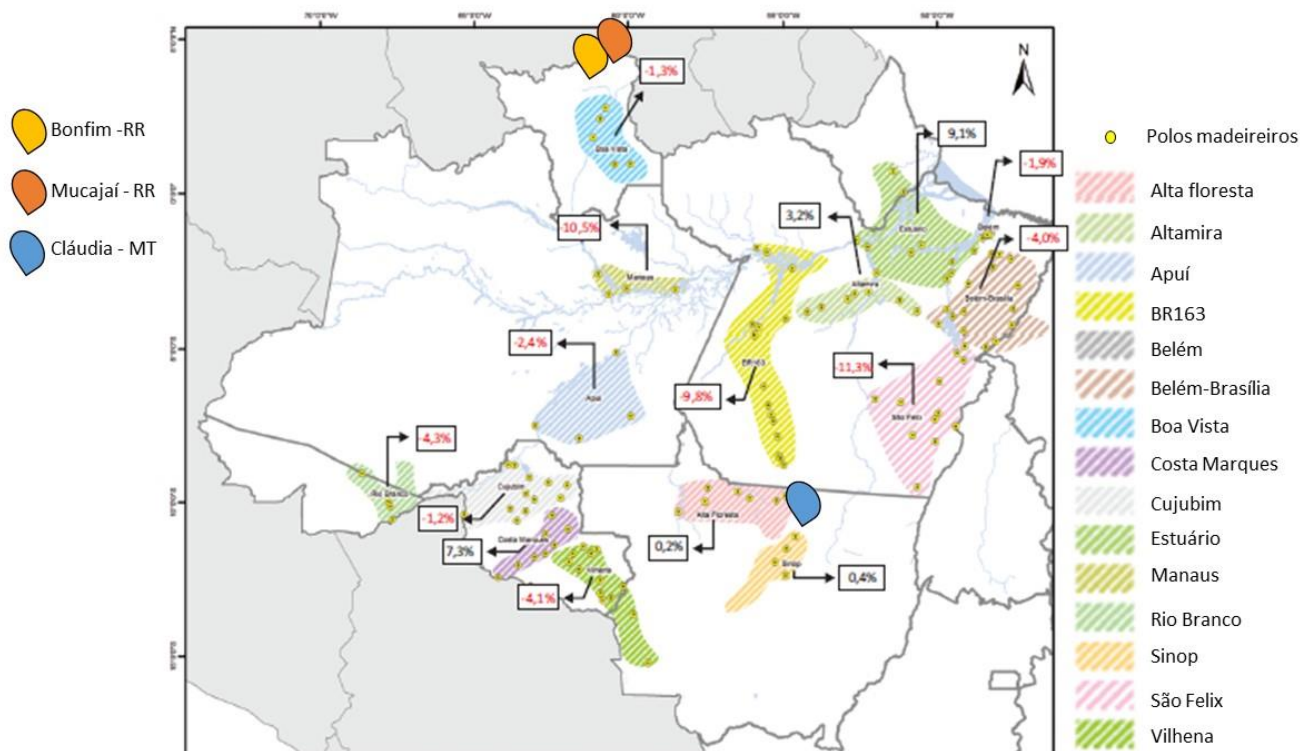
Figura 2 – Relevo do Brasil e localização das cidades de extração do Angelim Pedra



Fonte: Mapa de unidades de relevo do Brasil. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2006.

A madeira de Angelim Pedra extraída de três diferentes áreas de ocorrência no Brasil (Figura 3). Bonfim e Mucajaí são cidades de Roraima, estado do norte do país e Cláudia é uma cidade de Mato Grosso, localizado no centro-oeste do Brasil.

Figura 3 – Localização das cidades de extração das amostras da madeira Angelim Pedra.



Fonte: Google Maps (Com adaptação da autora).

Três lotes de Angelim-Pedra (*Hymenolobium petraeum* Ducke.) Foram colhidos em três cidades diferentes do Brasil: Bonfim (Bon) (3 ° 22'31"N; 59 ° 51'48 "W), estado brasileiro de Roraima; Mucajaí (Muc) (2 ° 22'43"N; 60 ° 55'46 "W), Estado brasileiro de Roraima e Cláudia (Cla) (11 ° 30'12"S; 54 ° 51'38" W), Estado do Mato Grosso. As características dos locais de colheita e das árvores de Angelim-Pedra são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características das regiões e espécies analisadas na pesquisa

Site	Bonfim (Bon)	Mucajaí (Muc)	Cláudia (Cla)
Idade da árvore (anos)	37-45	33-40	35-42
Altitude (m)	92	72	349
Precipitação (mm.ano ⁻¹)	1568	1639	1963

Temperatura Média (°C)	27.6	27.1	24.9
DAP* (cm)	102	110	107
Altura até o topo (m)	32	35	33

*DAP (Diâmetro à altura do peito).

Fonte: Autora

As madeiras foram compradas de um fornecedor da cidade de São Carlos – SP, as peças levadas até uma serraria próxima, na cidade de São Carlos e desdobradas em peças de caibros, terças e vigotas, e desta forma transportadas por rodovia até o pátio do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM), Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, onde foram estocadas obedecendo todo o procedimento exigido pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), inclusive o teor de umidade próximo a 12% (umidade de equilíbrio para madeiras), e posteriormente escolhidas as amostras e ensaiadas nesse mesmo local.

As propriedades físicas e mecânicas foram obtidas de acordo com as premissas e métodos de cálculo da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), fornecidos em seu anexo B “Determinação das Propriedades das Madeiras para Projetos de Estrutura”, e o número de determinações experimentais (NDE) por região de extração são apresentados na Tabela 5, que resultaram na realização de 624 determinações experimentais.

Tabela 5 - Propriedades físicas e mecânicas das madeiras de ANGELIM PEDRA.

Propriedades	Sigla	NDE por Região		
		Muc	Bon	Cla
Densidade aparente	ρ_{12}	12	12	12
Retração radial total	$\epsilon_{r,2}$	12	12	12
Retração tangencial total	$\epsilon_{r,3}$	12	12	12
Ponto de saturação das fibras	PSF	12	12	12
Resistência à compressão paralela às fibras	f_{c0}	12	12	12
Resistência à tração paralela às fibras	f_{t0}	12	12	12
Resistência à tração normal às fibras	f_{t90}	12	12	12
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras	f_{v0}	12	12	12

Resistência ao fendilhamento	f_{s0}	12	12	12
Resistência convencional no ensaio de flexão estática	f_M	12	12	12
Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras	E_{c0}	12	12	12
Módulo de elasticidade na tração paralela às fibras	E_{t0}	12	12	12
Módulo de elasticidade na flexão estática	E_m	12	12	12
Dureza paralela às fibras	f_{H0}	12	12	12
Dureza normal às fibras	f_{H90}	12	12	12
Tenacidade	W	12	12	12

NDE: Número de Determinações Experimentais

Fonte: Própria Autora.

Além dos valores médios das propriedades físicas e mecânicas avaliadas, o valor característico (f_{wk}) também foi calculado (Equação 3.1) para as propriedades de resistência seguindo as premissas da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997).

$$f_{wk} = \left(2 \cdot \frac{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_{(n/2)-1}}{(n/2)-1} - f_{n/2} \right) \cdot 1,10 \quad (3.1)$$

Da Equação 3.1, os resultados amostrais da resistência à solicitação específica (f) foram ser colocados em ordem crescente ($f_1 \leq f_2 \leq f_3 \dots \leq f_n$), desprezando-se o maior valor se o número de corpos de prova for ímpar, não se tomando para f_{wk} valor de resistência inferior a f_1 e nem inferior a 0,70 do valor médio da resistência. Cabe destacar que o valor característico da resistência na compressão paralela às fibras é a medida responsável por enquadrar a devida espécie de madeira nas classes de resistência referentes ao grupo das coníferas e das folhosas.

3.2 Propriedades Físicas

Este item apresenta a forma de obtenção das propriedades físicas obtidas nesta pesquisa.

3.2.1. Densidade Aparente

A densidade aparente da madeira ($\rho_{ap,12\%}$) a massa específica convencional obtida da razão entre a massa da amostra a 12% de teor de umidade ($m_{12\%}$) pelo seu respectivo volume ($v_{12\%}$), assim como expressa pela Equação 3.2.

$$\rho_{ap,12\%} = \frac{m_{12\%}}{v_{12\%}} \quad (3.2)$$

As amostras para a determinação da densidade aparente possuem dimensões 2x3x5 cm, e devem conter pelo menos cinco anéis de crescimento. Os equipamentos utilizados na sua obtenção consistem em paquímetro digital e balança eletrônica. O paquímetro digital utilizado na medição da densidade apresenta precisão de 0,01 milímetros, e a balança digital utilizada possui sensibilidade de 0,001 gramas.

3.2.2. Retração da Madeira

Segundo a norma ABNT NBR 7190 (1997), o grau de estabilidade dimensional da madeira é medido através das propriedades de retração e de inchamento em 12 amostras obtidas de um lote de madeira considerado homogêneo. Para a propriedade de retração (ϵ), os resultados são obtidos segundo as direções preferenciais 1, 2 e 3, correspondentes às direções (n) longitudinal (axial), radial e tangencial, respectivamente, além do coeficiente de retração volumétrica (ΔV).

As deformações específicas de retração e de variação volumétrica são obtidas pelas Equações 3.3 e 3.4.

$$\epsilon_{r,n} = \left(\frac{L_{n,sat} - L_{n,seca}}{L_{n,seca}} \right) \cdot 100 \quad (3.3)$$

$$\Delta V = \left(\frac{V_{sat} - V_{seca}}{V_{seca}} \right) \cdot 100 \quad (3.4)$$

Da Equação 3.3 tem-se que:

- r: propriedade de retração;
- n: direção de referência considerada – 1 (longitudinal), 2 (radial) ou 3 (tangencial);
- L: dimensão da amostra na direção axial (paralela às fibras).

Da Equação 3.4 tem-se que:

- V_{sat} : $L_{1,sat} \cdot L_{2,sat} \cdot L_{3,sat}$ é o volume da amostra saturada;
- V_{seca} : $L_{1,seca} \cdot L_{2,seca} \cdot L_{3,seca}$ é o volume da amostra seca;
- L: a dimensão representativa dos três lados do corpo de prova.

Para a determinação do grau de retratibilidade da madeira, o corpo de prova deve estar com umidade superior à saturação, caso não esteja é necessário re-umidificá-lo seguindo os procedimentos normativos descritos pela norma brasileira NBR 7190 (1997), e para a determinação do grau de inchamento a amostra deve estar seca.

3.3. Propriedades Mecânicas

3.3.1. Compressão Paralela às Fibras

O objetivo do ensaio de compressão paralela às fibras consiste em determinar a resistência e a rigidez à compressão da madeira de um lote de 12 m³ considerado homogêneo.

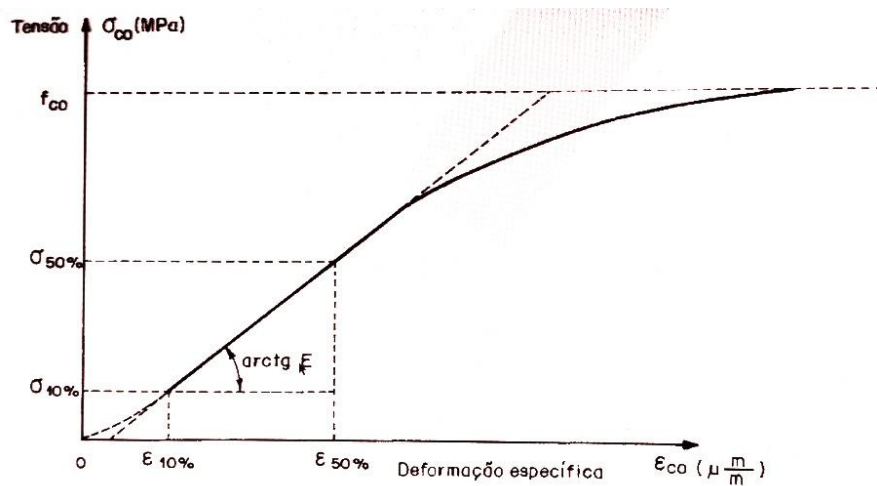
Define-se a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) como a razão entre a máxima força de compressão $F_{c0,máx}$ obtida do ensaio pela Área da seção transversal da amostra, assim como expressa a Equação 3.5.

$$f_{c,0} = \frac{F_{c0,máx}}{Área} \quad (3.5)$$

A rigidez ou o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}) é obtido da inclinação do trecho linear do diagrama tensão x deformação (Figura 4) específica, expressa pela Equação 3.6, em que $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ e $\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ correspondem às tensões e às deformações de compressão correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência f_{c0} medidas no terceiro ciclo de carregamento (Figura 5).

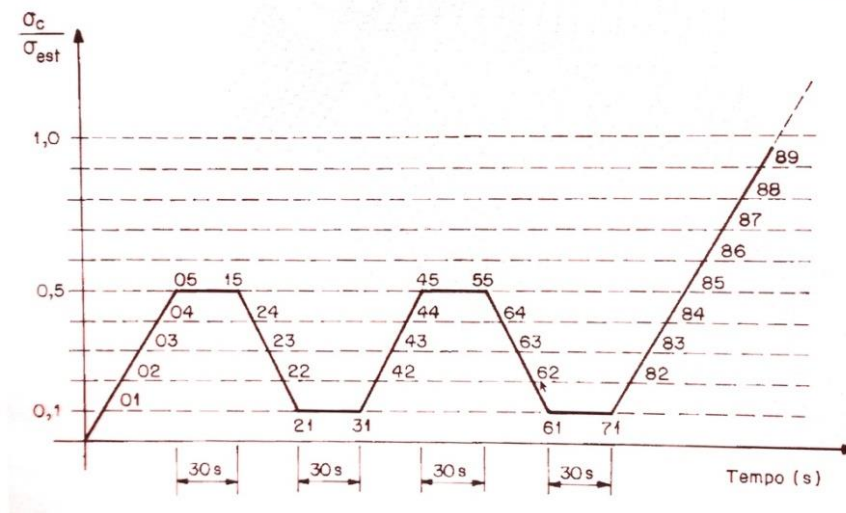
$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (3.6)$$

Figura 2 - Diagrama tensão x deformação na compressão paralela



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Figura 3 - Diagrama de carregamento para a determinação da rigidez da madeira à compressão.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

O corpo de prova para ensaio de compressão paralela às fibras deve ter seção quadrada igual a 50 mm e comprimento igual a 150 mm na direção das fibras.

A norma ABNT NBR 7190 (1997) determina que as deformações medidas nos corpos de prova na compressão paralela às fibras sejam avaliadas usando relógios comparadores, com precisão de 0,001 mm, fixados por meio de duas cantoneiras metálicas pregadas no corpo de prova, com distância nominal igual a 100 mm entre as linhas de pregação, afastadas 25 mm da extremidades do corpo de prova.

As aferições das deformações específicas devem ser feitas com extensômetros com exatidão mínima de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ e taxa de carregamento igual a 10 MPa/min, de forma monotônica e crescente. O afastamento de 25 mm das bordas do corpo de prova é justificado devido ao esmagamento da madeira nas bordas não interfira na aferição das deformações.

Considerando a heterogeneidade da madeira por ser um material natural e que cada do corpo de prova pode apresentar deformações diferentes (ICIMOTO et al., 2015), a norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) permite fixar os relógios comparadores em no mínimo duas faces do corpo de prova e atribuir a deformação característica a média das deformações registradas em cada relógio comparador (Figura 6).

Figura 4- Compressão paralela às fibras - (a) Imagem do corpo de prova com os relógios (b) Ensaio



(a)



(b)

Fonte: Imagens registradas pela Autora.

3.3.2. Compressão Normal às Fibras

O objetivo do ensaio de compressão normal às fibras consiste em determinar a resistência e a rigidez à compressão representativa de um lote de madeira considerado homogêneo. Define-se a resistência à compressão normal às fibras como o valor convencional da tensão de compressão $f_{c90} = F_{c90, \text{máx}} / \text{Área}$ para uma deformação específica residual de 2mm.m ($\epsilon_{2\text{mm}/\text{m}}$) na direção tangencial às fibras em um corpo de prova.

Para a determinação da resistência e da rigidez à compressão normal às fibras, norma brasileira estabelece que a geometria do corpo de prova padrão seja a mesma utilizada na compressão paralela às fibras, ou seja, prismático, de seção transversal quadrada 5×5 cm de lado e 15 cm de comprimento na direção tangencial das fibras, com precisão dimensional de 0,1mm. A medida das deformações no corpo de prova deve ser feita em pelo menos duas de suas faces. As deformações devem medidas com precisão mínima de $50 \mu\text{m/m}$, e o carregamento deve aplicado pela máquina de ensaio a uma taxa de 10MPa/min de modo monotônico.

A resistência a ser utilizada na determinação do módulo de elasticidade normal às fibras deve ser estimada ($f_{c90,est}$) por ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo, obtido da mesma amostra investigada. O carregamento deve ser aplicado com dois ciclos de carga e descarga (Figura 7) e de acordo com o procedimento já especificado anteriormente, e os registros das cargas e das deformações devem ser tomados a cada ponto do diagrama de carregamento. Para ensaios instrumentados o carregamento deve ser limitado a 70% da carga estimada, e levado à ruptura após a retirada dos instrumentos.

Figura 5 - Corpo de prova à compressão normal na prensa



Fonte: Imagens registradas pela Autora.

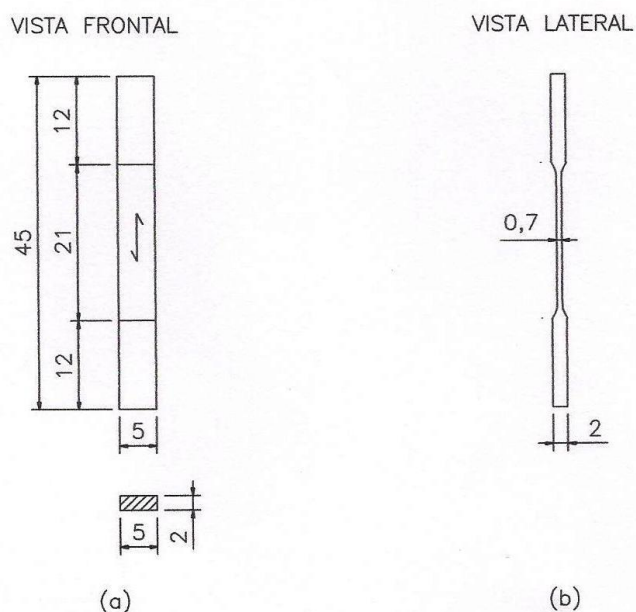
Define-se a rigidez à compressão normal às fibras como o módulo de elasticidade (E_{c90}) obtido da inclinação do trecho linear do diagrama tensão \times deformação específica, determinado pela Equação 3.6, em que $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ e $\epsilon_{10\%}$ e $\epsilon_{50\%}$ correspondem às tensões e às deformações de compressão correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência f_{c0} medidas no terceiro ciclo de carregamento, mais precisamente nos pontos de referência 71 e 85 do diagrama de carregamento mostrado na Figura 5.

$$E_{c90} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (3.7)$$

3.3.3. Tração Paralela às Fibras

O objetivo desse ensaio consiste em determinar a resistência e a rigidez à tração paralela às fibras da madeira de um lote considerado homogêneo. Segundo a norma brasileira, a resistência à tração paralela às fibras ($f_{t0}=F_{t0,m\acute{a}x}/A$) é a máxima tensão de tração que pode ser aplicada em um corpo de prova padrão ilustrado na Figura 8.

Figura 6– Corpo de prova de seção transversal retangular para ensaios de tração paralela às fibras, (a) Vista Frontal e (b) Vista Lateral. Medidas em centímetros.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

O módulo de elasticidade (Equação 3.8) é determinado como a inclinação do trecho linear da reta secante à curva tensão × deformação (Figura 2) definida pelos pontos $(\sigma_{10\%}, \sigma_{50\%})$ e $(\varepsilon_{10\%}, \varepsilon_{50\%})$ correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência à tração paralela às fibras medidas no ensaio, dado por:

$$E_{t0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (3.8)$$

Para a determinação da resistência e da rigidez à tração paralela às fibras, a norma brasileira permite um dos dois tipos de corpos de prova, um de seção

transversal circular e outro de seção transversal retangular. Neste trabalho foram utilizados corpos de prova de seção transversal retangular com dimensões $5 \times 2 \text{ cm}$ de lado e comprimento de 15 cm na direção paralela às fibras, com precisão dimensional de $0,1\text{mm}$ (Figura 9).

A medida das deformações no corpo de prova retangular deve ser feita nas faces opostas do lado medindo 5 cm , utilizando-se relógio comparador com exatidão de $50\mu\text{m}/\text{m}$, e o carregamento aplicado pela máquina de ensaios sobre o corpo de prova deve obedecer a uma taxa de $10 \text{ MPa}/\text{min}$.

Figura 7– Tração paralela às fibras - (a) Imagem do corpo de prova (b) Ensaio



(a)



(b)

Fonte: Imagens registradas pela Autora.

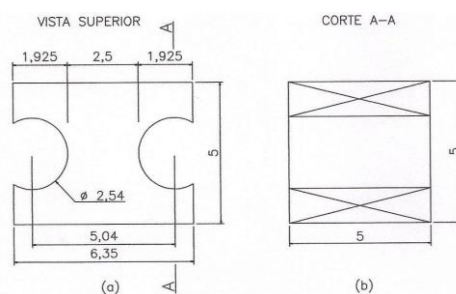
3.3.4. Tração Normal às Fibras

Esse ensaio objetiva determinar a resistência e a rigidez à tração normal às fibras da madeira de um lote considerado homogêneo de 12 m^3 .

Segundo a norma brasileira, a resistência à tração normal às fibras (f_{t90}) consiste na máxima tensão de tração que pode ser aplicada em um corpo de prova padrão (Figura 10), expressa pela Equação 3.9.

$$f_{t,90} = \frac{F_{t90,máx}}{A_{t90}} \quad (3.9)$$

Figura 8- Corpo de prova para o ensaio de tração normal às fibras, vista lateral e corte.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Da Equação 3.8, $F_{t90,máx}$ é a máxima força de tração normal às fibras aplicada ao corpo de prova, expressa em N, e A_{t90} ($\approx 25\text{mm} \times 50\text{mm}$) é área da seção transversal do corpo de prova em que deve atuar a força de tração normal, expressa em m^2 .

A norma brasileira não permite considerar essa propriedade mecânica na avaliação da segurança das estruturas, apenas para o estudo comparativo entre diferentes espécies de madeira. O corpo de prova é produzido com a precisão de $0,1\text{ mm}$ na geometria mostrada, e durante o ensaio o carregamento (Figura 11) deve ser aplicado preferencialmente na direção tangencial e a uma taxa de $2,5\text{ MPa}/\text{min}$.

Figura 9 – Tração normal às fibras - (a) Imagem do corpo de prova (b) Ensaio



(a)



(b)

Fonte: Imagens registradas pela Autora.

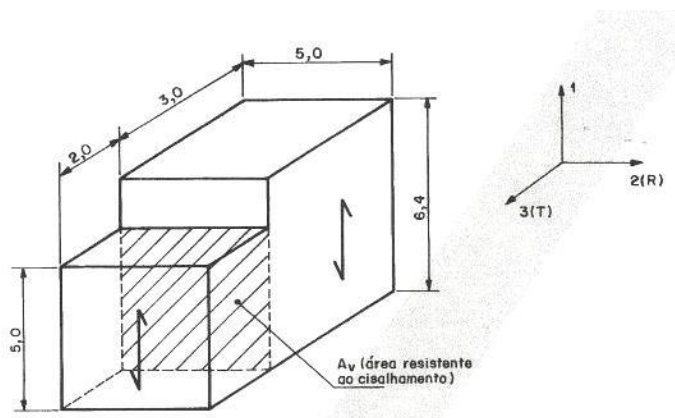
3.3.5. Cisalhamento Paralelo às Fibras

Esse ensaio objetiva determinar a resistência ao cisalhamento na direção paralela às fibras da madeira de um lote considerado homogêneo e com 12 m^3 . De

acordo com a norma brasileira, a resistência ao cisalhamento paralela às fibras (f_{v0}) é expressa pela máxima tensão de corte (Equação 3.10) que pode ser aplicada em um corpo de prova padrão (Figuras 12; 13), com precisão nas dimensões de 0,1 mm e carregamento aplicado a uma taxa de 2,5 MPa/min .

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,m\acute{a}x}}{A_{v0}} \quad (3.10)$$

Figura 10- Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Da Equação 3.10, $F_{v0,m\acute{a}x}$ é a máxima força de tração normal às fibras aplicada ao corpo de prova, expressa em N, e A_{v0} é a área ($\approx 50\text{mm} \times 50\text{mm}$) da seção transversal do corpo de prova em que deve atuar a força de tração normal, expressa em m^2 .

Figura 11 – Cisalhamento paralelo às fibras - (a) Imagem do corpo de prova (b) Ensaio



(a)



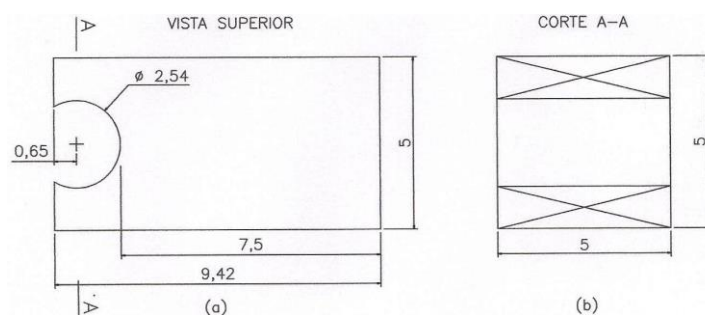
(b)

3.3.6. Fendilhamento Paralelo às Fibras

Esse ensaio objetiva determinar a resistência ao fendilhamento na direção paralela às fibras da madeira (Figura 14) de um lote considerado homogêneo e com 12 m³.

A resistência ao fendilhamento ($f_{s0}=F_{s0,máx}/A_{s0}$) consiste na razão entre a máxima força aplicada ($F_{s0,máx}$) pela área da seção útil ($A_{s0}\approx 75\text{mm}\times 50\text{mm}$) do corpo de prova padrão (Figura 15), com precisão nas dimensões de 0,1 mm e carregamento aplicado a uma taxa de 2,5 MPa/min.

Figura 12 - Corpo de prova para ensaio de fendilhamento, vista superior e corte.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

A norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) recomenda que a resistência ao fendilhamento paralelo às fibras seja considerada apenas como um valor convencional e deva ser utilizado apenas para estudo comparativo entre espécies de madeira.

Figura 13 – Fendilhamento paralelo às fibras - (a) Imagem do corpo de prova (b) Ensaio



(a)



(b)

3.3.7. Flexão Estática

O objetivo desse ensaio consiste em determinar a resistência e a rigidez da madeira à flexão simples de um lote considerado homogêneo e com 12 m³. Segundo a norma brasileira, a resistência à flexão simples (f_M) é obtida de acordo com a Equação 3.11, sendo $M_{máx}$ o valor do momento fletor máximo e W_e o módulo de resistência na flexão estática, que para seções retangulares $W_e=(b \cdot h)/6$, sendo b e h as medidas da base e da altura da seção transversal da amostra, respectivamente.

$$f_{wM} = \frac{M_{MÁX}}{W_e} \quad (3.11)$$

O ensaio de flexão simples (modelo estrutural de flexão a três pontos) definido pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) consiste em aplicar um carregamento concentrado no ponto médio de um corpo de prova suportado por apoios nas suas extremidades, sendo prismática a geometria da amostra (Figura 16) de seção transversal 5 x 5 cm e comprimento 115 cm.

Figura 14- Corpo de prova para a flexão estática.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

A determinação da rigidez ou do módulo de elasticidade (E_M) da madeira na flexão simples (Equação 3.12) é obtida pela inclinação da reta secante à curva de carga x deslocamento vertical entre os pontos correspondentes a 10% e 50% da carga máxima F_U , sendo a carga máxima F_U determinada por ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo.

$$E_M = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%}) \cdot L^3}{(V_{50\%} - V_{10\%}) \cdot 4 \cdot b \cdot h^3} \quad (3.12)$$

Da Equação 3.12, $F_{M,10\%}$ e $F_{M,50\%}$ são cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada ($F_{M,est} = F_U$) aplicada no corpo de prova, e representadas

respectivamente pelos pontos 71 e 85 do diagrama de carregamento mostrado na Figura 3, $V_{10\%}$ e $V_{50\%}$ são os deslocamentos medidos no meio do vão do corpo de prova correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada ($F_{M,est}$) e b, h e L consistem nas medidas da largura, altura e comprimento do corpo de prova.

A carga estimada ($F_{M,est}$) utilizada na determinação da rigidez da amostra é a mesma definida pela norma ABNT NBR 7190 (1997) como aquela que produz a ruptura do corpo de prova gêmeo (F_U). Conhecido o valor da resistência estimada $f_{M,est}$, o carregamento deve ser aplicado ao corpo de prova (Figura 17) em dois ciclos de carga e descarga a uma taxa de 10MPa/min.

Os deslocamentos sob o ponto de aplicação do carregamento devem ser medidos a cada ponto do diagrama de carregamento especificado na Figura 5 por transdutores de deslocamentos com precisão de 0,01 mm. Neste caso o registro dos deslocamentos é efetuado até o valor de 70% da carga estimada, em seguida retirado o instrumento de medição e o carregamento aumentado até a ruptura do corpo de prova.

Figura 15 – Flexão estática - (a) Imagem do corpo de prova (b) Ensaio



(a)



(b)

Fonte: Imagens registradas pela Autora.

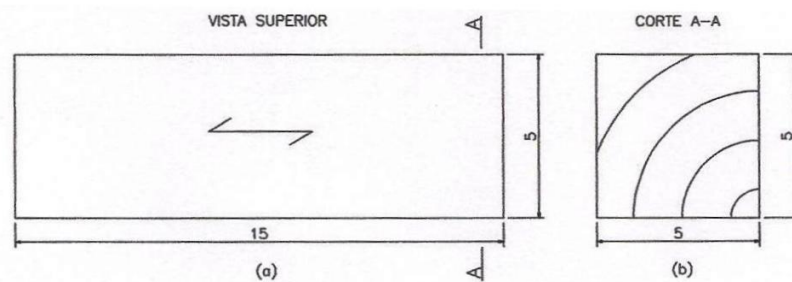
3.3.8. Dureza Janka

Esse ensaio objetiva determinar a dureza da madeira para um lote considerado homogêneo. A norma brasileira estabelece como critério para se determinar o grau de dureza de uma determinada espécie o método proposto por Janka, que define

convencionalmente a dureza (f_H) como a força máxima ($F_{m\acute{a}x}$) de compressão que atua em uma face do corpo de prova quando ocorre a penetração de uma semiesfera de área diametral ($A_{seção\ diametral}$) de $1,0\text{ cm}^2$. A dureza Janka é medida na direção paralela (f_{H0}) e perpendicular (f_{H90}) às fibras

A forma prismática do corpo de prova, como mostram as Figuras 18; 20, tem seção transversal medindo $5\times 5\text{ cm}$ e comprimento paralelo de 15 cm , elaborados com precisão dimensional de $0,1\text{ mm}$.

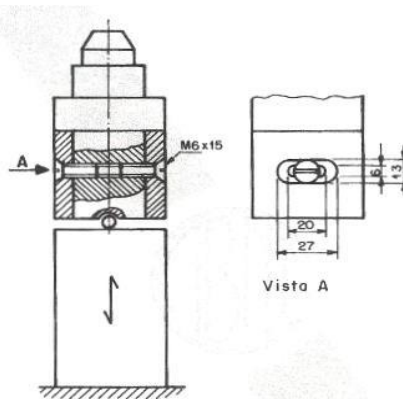
Figura 16 - Corpo de prova para o ensaio de dureza Janka. Vista Superior e Corte.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

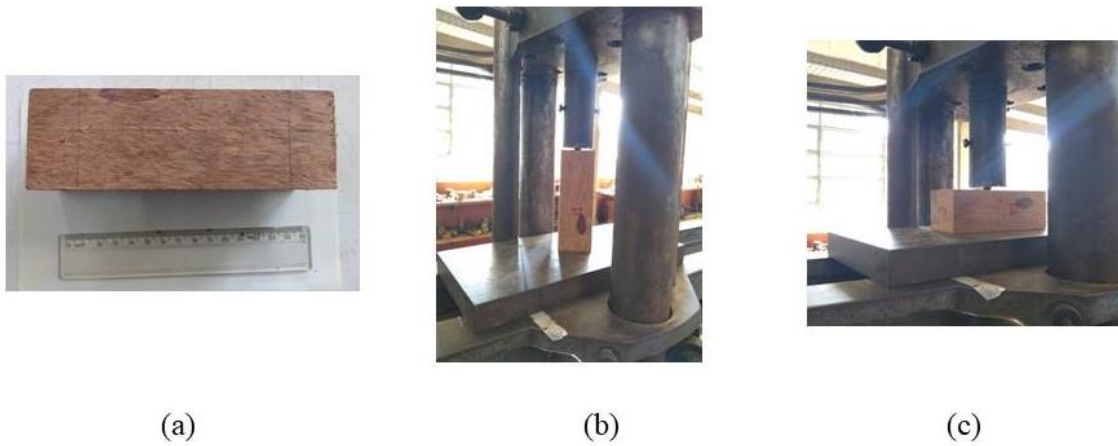
O esquema do dispositivo especial utilizado para se determinar o grau de dureza Janka é proposto pela NBR 7190:1997, como mostrado na Figura 19.

Figura 17 - Detalhe esquemático do dispositivo especial para o ensaio de dureza Janka



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Figura 18 – Dureza Janka - (a) Imagem do corpo de prova (b) Ensaio paralelo às fibras (c) Ensaio perpendicular às fibras

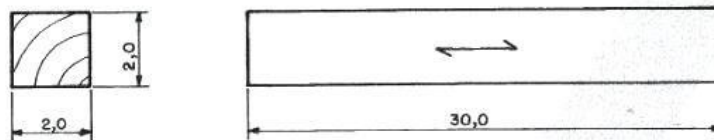


Fonte: Imagens registradas pela Autora.

3.3.9. Tenacidade e Resistência ao Impacto na Flexão

Esse ensaio objetiva determinar a tenacidade (W) da madeira (Figura 22), que consiste na energia necessária para a fratura do corpo de prova ($2 \times 2 \times 30$ cm - Figura 21), é calculada com o uso da Equação 3.13, em que m é a massa do pêndulo, g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{m/s}^2$), L é o comprimento do braço do pêndulo Charpy, que consiste na elevação máxima para o cálculo da energia potencial gravitacional, e L' é a altura final que o pêndulo atinge posteriormente ao impacto com o corpo de prova de madeira.

Figura 19 - Corpo de prova para o ensaio de tenacidade.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

$$W = m \cdot g \cdot (L - L') \quad (3.13)$$

O conhecimento da tenacidade (W) permite calcular a resistência ao impacto na flexão (fbw), assim como expressa a Equação 3.14, em que b e h são as medidas da seção transversal ($20 \text{mm} \times 20 \text{mm}$) do corpo de prova utilizado. O conhecimento da resistência ao impacto na flexão da madeira permite uma análise da estrutura mais precisa quando a mesma é solicitada por ações dinâmicas.

$$f_{bw} = \frac{1000 \cdot W}{b \cdot h} \quad (3.14)$$

Figura 20 – Tenacidade e Resistência ao Impacto na Flexão - (a) Corpo de prova posicionado para ensaio (b) Ensaio finalizado



Fonte: Imagens registradas pela Autora.

3.4. Análise Estatística

Para avaliar a influência do fator origem de extração das madeiras de Angelim Pedra nas propriedades físicas e mecânicas será utilizada a análise de variância de Kruskal-Wallis (teste não paramétrico). Para tanto, o nível de significância (α) da ANOVA a ser considerado é de 5%. A hipótese nula (H_0) consiste em considerar que a propriedade da madeira de uma determinada região é equivalente (ou representa) a mesma propriedade considerando o grupo com o conjunto dos resultados de todas as regiões de extração, e na diferença das médias dos dois grupos (região; conjunto das regiões) como hipótese alternativa (H_1). Dessa forma, P-valor (probabilidade P) do teste superior ao nível de 5% de significância implica em assumir a equivalência das médias dos dois grupos (aceitar H_0), e da não equivalência em caso contrário (P-valor < 0,05).

Como forma de investigar a abrangência dos resultados da ANOVA no estudo da influência das regiões de extração das madeiras para cada propriedade investigada, será utilizado a técnica de simulação ou de reamostragem “bootstrap”, que consiste em gerar por simulação de uma pequena amostra, numerosas outras com a retirada e reposição de alguns dos seus elementos. Para tanto, com o nível de

significância admitido de 5%, a hipótese nula assumida consistiu em admitir equivalência das médias de cada propriedade proveniente de uma região isolada com mesma propriedade considerando o conjunto das regiões, e a não equivalência dos dois grupos como hipótese alternativa. O número de simulações adotado nesta investigação será de 10000.

P-valor simulado maior que 5%, que significa em aceitar, por extrapolação, que a média dos dois grupos é equivalente, e não equivalente para P-valor menor que 5%.

A estimativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Pedra em função da densidade aparente será avaliada com o uso de modelos de regressão de acordo com as Equações de 3.15 a 3.18, e fundamentados em análise de variância (ANOVA).

Nas Equações de 3.15 a 3.18, Y denota a variável dependente, podendo ser uma propriedade física ou mecânica, X consiste na variável independente, aqui definida como sendo a densidade aparente e a e b são os parâmetros dos modelos ajustados pelo método dos mínimos quadrados.

$$Y = a + b \cdot X \quad [\text{Lin - linear}] \quad (3.15)$$

$$Y = a \cdot e^{b \cdot X} \quad [\text{Exp - exponencial}] \quad (3.16)$$

$$Y = a + b \cdot \ln(X) \quad [\text{Log - logarítmico}] \quad (3.17)$$

$$Y = a \cdot X^b \quad [\text{Geo - geométrico}] \quad (3.18)$$

Pela ANOVA dos modelos de regressão, considerados ao nível de 5% de significância (α), a hipótese nula formulada consiste na não representatividade dos modelos testados ($H_0: \beta = 0$), e na representatividade como hipótese alternativa ($H_1: \beta \neq 0$). P-valor inferior ao nível de significância considerado implica em aceitar H_0 e o modelo testado não é representativo, portanto, variações de $\rho_{ap,12\%}$ são incapazes de explicar as variações da propriedade estimada e deve ser refutado, caso contrário o modelo testado é representativo.

Além do uso da ANOVA, que permite aceitar ou não a representatividade dos modelos testados, os valores do coeficiente de determinação (R^2) serão obtidos como forma de avaliar a capacidade das variações de densidade aparente em explicar a

variável analisada, possibilitando eleger, dentre os modelos considerados significativos, os de melhor ajuste. Cabe ressaltar que a densidade aparente será utilizada para estimar as 15 propriedades estudadas nesta pesquisa, sendo 3 propriedades físicas e 12 propriedades mecânicas, com o uso de 4 modelos matemáticos distintos, linear, exponencial, logarítmico e geométrico, totalizando 60 ajustes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira Angelim-Pedra de diferentes locais de extração

As tabelas 6, 7 e 8 apresentam os valores médios (\bar{x}), coeficientes de variação (Cv), valores máximos (Max) e mínimos (Min), o intervalo de confiança médio (IC - 95% de confiança) das propriedades físicas e mecânicas de Angelim- Pedra para cada lote. Além disso, são apresentados os valores característicos de resistência para a espécie de madeira Angelim-Pedra.

Tabela 6 – Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira Angelim-Pedra do Bonfim (Bon)

Propriedade	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	CI	f_{wk} (MPa)
$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm ³)	0.64	4.00	0.61	0.69	0.62; 0.66	---
$\epsilon_{r,2}$ (%)	3.68	12.00	3.13	4.41	3.39; 3.96	---
$\epsilon_{r,3}$ (%)	5.63	19.00	4.23	7.51	5.02; 6.23	---
$\epsilon_{r,4}$ (%)	0.48	14.00	0.38	0.58	0.43; 0.52	---
$\epsilon_{r,v}$ (%)	9.65	15.00	7.63	11.96	8.75; 10.55	---
FSP (%)	23.70	21.00	16.44	32.58	20.57; 26.83	---
f_{c0} (MPa)	54.53	11.00	45.00	65.00	50.99; 58.07	<u>49.50</u>
f_{c90} (MPa)	12.67	20.00	9.00	16.00	11.03; 14.30	8.14
f_{t0} (MPa)	66.66	18.00	47.00	87.00	59.89; 73.43	59.26
f_{t90} (MPa)	3.20	21.00	2.30	4.10	2.78; 3.62	2.55
f_{v0} (MPa)	12.08	19.00	9.00	16.00	10.62; 13.53	9.00
f_{s0} (MPa)	0.64	10.00	0.60	0.80	0.59; 0.68	0.66
f_M (MPa)	74.87	14.00	51.00	90.00	68.34; 81.40	63.95
f_{H0} (MPa)	78.41	9.00	67.00	88.00	74.01; 82.81	72.25
f_{H90} (MPa)	48.04	10.00	42.00	55.00	45.14; 50.94	44.75
W (N·m)	7.20	33.00	0.50	1.38	5.70; 8.70	---
E_{c0} (MPa)	11191	14.00	9368	14540	10212; 12169	---
E_{t0} (MPa)	10840	16.00	8704	13981	9960; 11719	---
E_M (MPa)	10181	14.00	8624	12569	9301; 11060	---
E_{c90} (MPa)	557	13.00	466	673	510; 604	---

Fonte: Autora

Tabela 7– Propriedades Físicas e Mecânicas da madeira Angelim-Pedra de Mucajá (Muc)

Propriedade	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	CI	f_{wk} (MPa)
$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm ³)	0.64	14.00	0.53	0.83	0.58; 0.70	---
$\varepsilon_{r,2}$ (%)	3.94	29.00	2.73	6.52	3.22; 4.65	---
$\varepsilon_{r,3}$ (%)	6.31	22.00	4.18	8.79	5.42; 7.19	---
$\varepsilon_{r,4}$ (%)	0.45	23.00	0.28	0.60	0.39; 0.51	---
$\varepsilon_{r,v}$ (%)	10.48	23.00	7.40	15.40	8.96; 12.00	---
FSP (%)	22.11	19.00	16.16	28.09	19.47; 24.75	---
f_{c0} (MPa)	55.45	21.00	39.00	81.00	48.05; 62.85	<u>42.81</u>
f_{c90} (MPa)	12.08	28.00	8.00	18.00	9.91; 14.25	7.70
f_{t0} (MPa)	73.25	27.00	36.00	109.00	60.66; 85.84	48.22
f_{t90} (MPa)	3.46	31.00	1.80	4.90	2.78; 4.13	2.13
f_{v0} (MPa)	15.28	17.00	10.00	19.00	13.65; 16.90	11.20
f_{s0} (MPa)	0.61	27.00	0.40	0.90	0.52; 0.70	0.51
f_M (MPa)	72.63	13.00	55.00	87.00	66.51; 78.75	60.42
f_{H0} (MPa)	80.03	20.00	59.00	118.00	69.93; 90.13	66.31
f_{H90} (MPa)	47.93	20.00	39.00	67.00	41.91; 53.95	42.70
W (N·m)	6.30	42.00	5.00	13.80	4.58; 8.01	---
E_{c0} (MPa)	10850	20.00	8367	16431	9460; 12240	---
E_{t0} (MPa)	10851	27.00	8265	18758	9022; 12679	---
E_M (MPa)	10427	27.00	8401	14512	9340; 11513	---
E_{c90} (MPa)	541	12.00	439	672	500; 582	---

Fonte: Autora

Tabela 8– Propriedades Físicas e Mecânicas da madeira Angelim-Pedra de Cláudia (Cla)

Propriedade	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	CI	f_{wk} (MPa)
$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm ³)	0.61	16.00	0.49	0.77	0.54; 0.67	---
$\varepsilon_{r,2}$ (%)	2.94	29.00	1.96	4.68	2.40; 3.48	---
$\varepsilon_{r,3}$ (%)	3.86	24.00	2.51	5.27	3.28; 4.44	---
$\varepsilon_{r,4}$ (%)	0.65	23.00	0.43	0.86	0.55; 0.74	---
$\varepsilon_{r,v}$ (%)	7.01	26.00	4.56	10.09	5.84; 8.18	---
FSP (%)	21.51	14.00	16.34	26.68	19.56; 23.45	---
f_{c0} (MPa)	52.92	17.00	37.00	69.00	54.12; 65.71	<u>44.84</u>
f_{c90} (MPa)	10.75	27.00	7.00	16.00	8.89; 12.61	6.60
f_{t0} (MPa)	68.50	19.00	48.00	85.00	60.13; 76.87	41.33

f_{t90} (MPa)	3.38	29.00	1.70	4.80	2.75; 4.00	2.00
f_{v0} (MPa)	15.17	21.00	10.00	20.00	13.16; 17.17	10.61
f_{s0} (MPa)	0.63	18.00	0.50	0.80	0.56; 0.70	0.51
f_M (MPa)	79.63	15.00	59.00	106.00	72.80; 86.46	68.87
f_{H0} (MPa)	82.26	11.00	70.00	100.00	76.27; 88.24	74.85
f_{H90} (MPa)	52.56	19.00	42.00	80.00	46.28; 58.83	46.22
W (N·m)	6.51	44.00	2.32	11.27	4.68; 8.33	---
E_{c0} (MPa)	11302	13.00	8602	12936	10389; 12214	---
E_{t0} (MPa)	11323	12.00	8633	13481	10524; 12103	---
E_M (MPa)	10860	13.00	9181	13421	9976; 11743	---
E_{c90} (MPa)	608	12.00	445	719	563; 653	---

Fonte: Autora

Observando os valores característicos de resistência a compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$), os lotes de madeira Angelim-Pedra podem ser classificados na classe de resistência C40 de madeiras, de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997). A norma também classifica Angelim-Pedra como madeira C40, independentemente da região de extração. Dias e Lahr (2004) encontraram um $f_{c0,k}$ de 44,5 MPa, também classificando a madeira Angelim-Pedra na classe de resistência C40.

Os valores médios de resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}) encontrados nas regiões Bonfim (66,66 MPa), Mucajaí (73,25 MPa) e Claudia (68,50 MPa) são menores os valores dispostos na norma brasileira (75,5 MPa). Considerando a pesquisa de Dias e Lahr (71 MPa) (2004), a única região que apresentou maior valor de f_{t0} foi Mucajaí.

Observando os valores médios de cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}), valores de todos os lotes (Bon - 12,08 MPa; Muc - 15,28 MPa; Cla - 15,17 MPa) são superiores ao valor ilustrado na norma brasileira (8,8 MPa) ABNT NBR 7190 (1997). Comparando com o valor obtido por Dias e Lahr (13,3 MPa) (2004), os valores da região de Mucajaí e Claudia foram maiores. A pesquisa do IPT (2019) encontrou uma resistência de cisalhamento de 12,3 MPa, próxima aos resultados do presente trabalho.

Os resultados das propriedades mecânicas (f_{c0} , f_{t0} , f_{t90} , f_{v0} , f_{s0} , f_M , E_{c0} , E_{t0} , E_M , f_{H0} , f_{H90} , W) obtidos neste estudo foram próximos aos resultados dos estudos por Dias e

Lahr (2004), e próximos aos dados fornecidos pelo Instituto de Pesquisa Tecnológica (2019).

A Norma Brasileira ABNT NBR 7190 (1997), estabelece a relação entre a retratilidade longitudinal ($\epsilon_{r,4}$) e a tangencial ($\epsilon_{r,3}$) igual a 1/23. O valor obtido na presente pesquisa, considerando todos os lotes de madeira Angelim-Pedra é de 1/9, 23 (IC - 95%: 1/8,33; 1/11), próximo ao valor obtido na pesquisa de Almeida, (2005), igual a 1/10, considerando espécies de madeira tropical de diversas classes de resistência. O resultado e o intervalo de confiança obtidos para esta espécie de madeira mostram que o valor proposto para a relação é mais representativo, em vez do valor disposto na norma que demonstra a demanda por novos estudos sobre o tema para uma nova revisão na Norma Brasileira.

Analisando os valores do Ponto de Saturação de Fibra (FSP) de todos os lotes de madeira, os valores médios da FSP são de 22,44% (IC - 95%: 22,05%; 22,82%). Os valores apresentados estão próximos do valor proposto por Almeida (2005), igual a 22%, com intervalo de confiança ligeiramente superior ao valor proposto. A Norma Brasileira determina que o FSP é igual a 25%. Observando os dados obtidos no presente estudo, o valor proposto por Almeida, (2005) é mais representativo do que o valor da norma. Essas informações podem contribuir para uma revisão sobre a norma.

Considerando a estabilidade dos lotes de madeira Angelim-Pedra, a razão entre os valores médios de encolhimento tangencial total ($\epsilon_{r,3}$) e o encolhimento radial total ($\epsilon_{r,2}$) são iguais a 1,48 (IC - 95%: 1,43; 1,53). Segundo Galvão e Jankowsky, (1995), os lotes de madeira Angelim-Pedra podem ser considerados dimensionalmente estáveis, com razão e intervalo de confiança próximo a 1,50, indicando um bom desempenho quando utilizado para fins estruturais (CAVALHEIRO et al, 2016; LOGSDON, 2003; RUELLE, 2011; ROMAGNOLI, CAVALLI, 2014).

4.2 Resultados de análise estatística

A Tabela 9 mostra os resultados (p-valores) do Kruskal-Wallis ANOVA obtidos utilizando o software BioEstat 5.3®, para cada propriedade física e mecânica, confrontando uma região com o conjunto de resultados das três regiões (Bon, Muc, Cla) com valores P considerados significativos (valor P <0,05).

Tabela 9 - Resultados dos valores P do Kruskal-Wallis ANOVA.

Prop.	Bonx{Bon, Muc, Cla}	Mucx{Bon, Muc, Cla}	Clax{Bon, Muc, Cla}
ρ_{12}	0.2546	0.8201	0.1725
$\epsilon_{r,2}$	0.3172	0.3530	0.0537
$\epsilon_{r,3}$	0.3978	<u>0.0371</u>	<u>0.0034</u>
$\epsilon_{r,4}$	0.8435	0.1491	<u>0.0183</u>
$\epsilon_{r,v}$	0.3172	0.1398	<u>0.0132</u>
FSP	0.4972	0.9241	0.5595
f_{c0}	0.7378	0.8672	0.6155
f_{c90}	0.3501	0.8669	0.2706
f_{t0}	0.5995	0.4455	0.8116
f_{t90}	0.4964	0.6333	0.8394
f_{v0}	0.0928	0.0938	0.2586
f_{s0}	0.6024	0.4915	0.8633
f_M	0.8955	0.4384	0.3648
f_{H0}	0.8394	0.5835	0.4525
f_{H90}	0.9905	0.2883	0.2829
W	0.4042	0.6591	0.6940
E_{c0}	0.8489	0.3912	0.5048
E_{t0}	0.9430	0.4603	0.4181
E_M	0.5048	0.7388	0.3172
E_{c90}	0.6169	0.2578	0.1027

Fonte: Autora

Observando os dados da Tabela 6, é possível inferir que a região do Bonfim possui equivalência total (100%) quando comparado com o conjunto de resultados de todas as regiões. Mucajaí apresentou índice de equivalência (IE) igual a 93% e região de Cláudia apresentou índice de equivalência de 85% observando os resultados das propriedades em comparação com o conjunto de resultados.

Observando quais propriedades não eram equivalentes para as regiões de Mucajaí e Cláudia, todas as propriedades são propriedades físicas (propriedades de retração). Essas propriedades estão mais relacionadas aos fatores climáticos, que podem explicar a não equivalência (CSORDÓS, NÉMETH, BAK, 2014; ROMAGNOLI, CAVALLI, 2014)

A Tabela 10 mostra os valores P de ANOVA, pelo uso do software BioEstat 5.3®, os resultados extrapolados pela técnica de simulação ou reamostragem de cada propriedade confrontando uma região com o conjunto de resultados das três regiões (Bon, Muc, Cla).

Tabela 10 - Resultados dos valores P da ANOVA utilizando a técnica Bootstrap.

Prop.	Bonx{Bon, Muc, Cla}	Mucx{Bon, Muc, Cla}	Clax{Bon, Muc, Cla}
ρ_{12}	0.2378	0.3614	0.4779
$\epsilon_{r,2}$	0.4316	0.1846	0.0645
$\epsilon_{r,3}$	0.4318	<u>0.0357</u>	<u>0.0089</u>
$\epsilon_{r,4}$	0.2416	0.0817	<u>0.0112</u>
$\epsilon_{r,v}$	0.4074	0.0815	<u>0.0136</u>

FSP	0.3694	0.1969	0.4732
f _{c0}	0.1278	0.2852	0.3999
f _{c90}	0.3918	0.1721	0.2818
f _{t0}	0.4131	0.4774	0.1543
f _{t90}	0.3943	0.2855	0.0857
f _{v0}	0.0872	0.1009	0.2365
f _{s0}	0.2708	0.3386	0.0943
f _M	0.1672	0.3608	0.2977
f _{H0}	0.4108	0.0648	0.4436
f _{H90}	0.4077	0.4216	0.2993
W	0.4558	0.3409	0.1394
E _{c0}	0.1142	0.3256	0.2778
E _{t0}	0.2030	0.1594	0.3930
E _M	0.4755	0.1063	0.4492
E _{c90}	0.3639	0.2553	0.1095

Fonte: Autora

De acordo com os resultados da ANOVA utilizando a técnica bootstrap, os índices de equivalência permaneceram iguais, com equivalência total para a região do Bonfim (100%), 93% para a região de Mucajaí e 85% para a região de Cláudia. É importante ressaltar que a técnica bootstrap confirma os resultados obtidos com a Kruskal-Wallis ANOVA, com índices de equivalência elevados.

Em seguida, observando os resultados estatísticos, o local de extração não influenciou propriedades físicas e mecânicas da madeira Angelim-Pedra. Norma Brasileira ABNT NBR 7190 (1997) não considera a influência do local de colheita em propriedades físicas e mecânicas de lotes de madeira. Os resultados obtidos na presente pesquisa confirmam a consideração da Norma.

Machado et al. (2014) e Lahr et al. (2004) alcançaram resultados semelhantes do presente estudo analisando a influência do local de compras de Pau-preto e Jatobá, respectivamente. Silva et al. (2018), caso contrário, encontrou resultados diferentes, com local de colheita influenciando propriedades físicas e mecânicas da madeira cupiúba.

4.3 Modelos de Regressão para Estimativas Físicas e Mecânicas

As Tabelas 11 e 12 exibem os melhores ajustes obtidos pela propriedade levando em conta os quatro tipos de ajustes utilizados nesta pesquisa para as três regiões (considerando o conjunto de regiões como um único grupo). Neste caso a e b são os coeficientes ajustados, R² o coeficiente de determinação (mede a qualidade do ajuste) e o valor p sendo a probabilidade p que permite julgar a representatividade (valor p < 0,05) ou a não representatividade (p-valor > 0,05) dos modelos testados.

Vale ressaltar que os modelos ajustados foram estimados pela densidade aparente, cujos valores variaram de 0,49 a 0,83 g / cm³.

Tabela 11 - Resultados dos valores P dos Modelos ANOVA de Regressão - Densidade Aparente

Prop.	Model	P-vale	a	b	Expression	R ² (%)
$\varepsilon_{r,2}$	Geométrica	<u>0.0000</u>	6.99	1.53	$\varepsilon_{r,2} = a \cdot \rho_{12}^b$	47.66
$\varepsilon_{r,3}$	Geométrica	<u>0.0013</u>	9.35	1.31	$\varepsilon_{r,3} = a \cdot \rho_{12}^b$	26.57
$\varepsilon_{r,4}$	Logarítmica	<u>0.0000</u>	0.16	-0.77	$\varepsilon_{r,4} = a + b \cdot \ln(\rho_{12})$	40.52
$\varepsilon_{r,v}$	Geométrica	<u>0.0001</u>	17.12	1.43	$\varepsilon_{r,v} = a \cdot \rho_{12}^b$	37.57
FSP	Geométrica	<u>0.3641</u>	24.72	0.24	$FSP = a \cdot \rho_{12}^b$	2.43
f_{c0}	Logarítmica	<u>0.0027</u>	71.94	37.41	$f_{c0} = a + b \cdot \ln(\rho_{12})$	23.45
f_{c90}	Logarítmica	<u>0.0181</u>	16.55	10.03	$f_{c90} = a + b \cdot \ln(\rho_{12})$	15.35
f_{t0}	Geométrica	0.4610	76.161	0.24	$f_{t0} = a \cdot \rho_{12}^b$	1.61
f_{t90}	Geométrica	<u>0.0309</u>	2.14	-0.87	$f_{t90} = a \cdot \rho_{12}^b$	12.97
f_{v0}	Linear	0.0819	7.06	11.44	$f_{v0} = a + b \cdot \rho_{12}$	8.63
f_{s0}	Linear	0.7976	0.59	0.07	$f_{s0} = a + b \cdot \rho_{12}$	0.20
f_M	Logarítmica	0.2597	67.46	17.67	$f_M = a + b \cdot \ln(\rho_{12})$	3.72
f_{H0}	Linear	<u>0.0007</u>	31.08	78.27	$f_{H0} = a + b \cdot \rho_{12}$	28.93
f_{H90}	Linear	<u>0.0007</u>	12.34	59.12	$f_{H90} = a + b \cdot \rho_{12}$	29.08
W	Logarítmica	0.1840	9.01	4.98	$W = a + b \cdot \ln(\rho_{12})$	5.13
E_{c0}	Linear	<u>0.0007</u>	3538	12047	$E_{c0} = a + b \cdot \rho_{12}$	29.13
E_{t0}	Linear	<u>0.0181</u>	4472	10388	$E_{t0} = a + b \cdot \rho_{12}$	15.33
E_M	Linear	0.1376	7417	4885	$E_M = a + b \cdot \rho_{12}$	6.37
E_{c90}	Exponencial	0.2107	448.92	0.36	$E_{c90} = a \cdot e^{b \cdot \rho_{12}}$	4.57

Fonte: Autora

Observando a Tabela 11, oito modelos de regressão foram significativos pela ANOVA (valor p inferior a 0,05) e todos os modelos apresentaram coeficiente de determinação inferior a 50%, indicando a má qualidade no ajuste realizado (MONTGOMERY, 2012). Portanto, não é possível estimar propriedades físicas e mecânicas em função da densidade aparente da espécie de madeira Angelim-Pedra.

Tabela 12 - Resultados dos valores P dos Modelos de Regressão ANOVA – Resistência a compressão paralela às fibras.

Prop.	Model	P-value	a	b	Expression	R ² (%)
-------	-------	---------	---	---	------------	--------------------

$\rho_{ap,12\%}$	Linear	<u>0.0028</u>	0.41	0.004	$\rho_{12} = a + b \cdot f_{c0}$	23.43
$\varepsilon_{r,2}$	Linear	<u>0.0030</u>	0.83	0.05	$\varepsilon_{r,2} = a + b \cdot f_{c0}$	23.04
$\varepsilon_{r,3}$	Linear	0.1713	3.14	0.04	$\varepsilon_{r,3} = a + b \cdot f_{c0}$	5.43
$\varepsilon_{r,4}$	Exponencial	<u>0.0321</u>	0.90	-0.01	$\varepsilon_{r,4} = a \cdot e^{b \cdot f_{c0}}$	10.34
$\varepsilon_{r,v}$	Linear	<u>0.0383</u>	4.10	0.09	$\varepsilon_{r,v} = a + b \cdot f_{c0}$	12.01
FSP	Linear	<u>0.6296</u>	24.47	-0.04	$FSP = a + b \cdot f_{c0}$	0.69
f_{c90}	Linear	<u>0.0000</u>	-3.32	0.28	$f_{c90} = a + b \cdot f_{c0}$	<u>70.95</u>
f_{t0}	Geométrica	0.1863	20.07	0.31	$f_{t0} = a \cdot f_{c0}^b$	5.08
f_{t90}	Geométrica	0.3364	1.04	0.28	$f_{t90} = a \cdot f_{c0}^b$	2.72
f_{v0}	Linear	<u>0.0169</u>	7.20	0.13	$f_{v0} = a + b \cdot f_{c0}$	15.64
f_{s0}	Linear	0.4452	0.53	0.002	$f_{s0} = a + b \cdot f_{c0}$	1.72
f_M	Logarítmica	0.6587	56.06	4.95	$f_M = a + b \cdot \ln(f_{c0})$	0.58
f_{H0}	Linear	<u>0.0000</u>	37.78	0.78	$f_{H0} = a + b \cdot f_{c0}$	40.73
f_{H90}	Linear	<u>0.0230</u>	30.56	0.35	$f_{H90} = a + b \cdot f_{c0}$	14.28
W	Exponencial	0.5792	4.87	0.004	$W = a \cdot e^{b \cdot f_{c0}}$	0.98
E_{c0}	Linear	<u>0.0000</u>	3868.61	133.36	$E_{c0} = a + b \cdot f_{c0}$	<u>50.27</u>
E_{t0}	Linear	<u>0.0004</u>	4174.93	125.71	$E_{t0} = a + b \cdot f_{c0}$	31.61
E_M	Linear	<u>0.0000</u>	4923.71	102.44	$E_M = a + b \cdot f_{c0}$	39.42
E_{c90}	Exponencial	<u>0.0035</u>	366.21	3.73	$E_{c90} = a \cdot e^{b \cdot f_{c0}}$	21.40

Fonte: Autora

De acordo com os valores dispostos na Tabela 13, a maioria dos ajustes de propriedades de madeira foram considerados significativos, mas apenas duas propriedades (f_{c90} e E_{c0}) apresentaram coeficiente de determinação (R^2) acima de 50%, o que pode ser considerado de boa qualidade no ajuste (MONTGOMERY, 2012), indicando a possibilidade de estimativa em função do f_{c0} das propriedades referidas. O baixo coeficiente de determinação para ajustes significativos e o valor p para as demais propriedades indica a baixa representatividade da resistência a compressão paralela às fibras como um estimador das propriedades de resistência e rigidez utilizadas no desenho estrutural.

Para analisar as relações entre os valores característicos utilizados na caracterização simplificada da espécie de madeira, apresenta-se na Tabela 13 as relações obtidas considerando todos os lotes de madeira (valores médios) da madeira

Angelim-Pedra, com intervalo médio de confiança (IC - 95% de confiança) e os valores dispostos na Norma Brasileira para madeiras.

Tabela 13 - Relações entre valores característicos - Espécie de madeira Angelim-Pedra.

Relação	$f_{c0,k}/f_{t0,k}$ (CI)	$f_{m,k}/f_{t0,k}$ (CI)	$f_{v0,k}/f_{c0,k}$ (CI)	$f_{c90,k}/f_{c0,k}$ (CI)
ABNT NBR 7190 (1997)	0.77	1.00	0.12	0.25
Presente pesquisa (<i>Hymenolobium</i> <i>petraeum</i>)	0.94 (0.89; 0.98)	1.33 (1.22; 1.43)	0.21 (0.19; 0.23)	0.16 (0.155; 0.165)

Fonte: Autora

Observando as relações obtidas na presente pesquisa, deve-se ressaltar que o valor disposto na Norma Brasileira para o valor característico de resistência a compressão e resistência à tração paralela às fibras é conservador, induzindo uma relação que pode levar a um desenho estrutural seguro.

Verificando a relação entre resistência ao cisalhamento e resistência de compressão paralela às fibras, o valor apresentado na Norma Brasileira é conservador, subestimando a real força do cisalhamento, levando a um projeto estrutural seguro para madeiras.

A relação entre resistência a compressão normal e paralela às fibras alcançado neste estudo é inferior ao valor apresentado na Norma Brasileira, mesmo considerando o intervalo de confiança. O valor padronizado superestima essa relação para a presente espécie de madeira, o que pode levar a um desenho inseguro dos membros estruturais.

Considerando os resultados apresentados, o intervalo de confiança de todas as relações analisadas foi colocado acima dos valores apresentados na Norma Brasileira, o que indica que a demanda uma nova revisão sobre os valores das relações pode ser realizada para cumprir um cálculo estrutural mais adequado e mais seguro, sem super estimativa ou subestimação das propriedades, Logsdon et al, (2003), analisando a espécie de madeira de *Hymenolobium petraeum*, encontrou diferentes relações para a especificação de madeira referida, confirmando a necessidade de revisão da Norma Brasileira.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As propriedades físicas e mecânicas de três lotes de Angelim-Pedra extraídos de três locais diferentes foram determinadas após as prescrições descritas na Norma Brasileira ABNT NBR 7190. A caracterização foi considerada adequada. Todos os lotes de madeira Angelim-Pedra foram classificados na classe de resistência C40, compatíveis com outras caracterizações na literatura e na Norma brasileira.

Considerando a análise estatística (Kruskal-Wallis ANOVA e técnica bootstrap), lotes de todas as regiões apresentaram um índice de equivalência elevado quando confrontados com o conjunto de resultados de todos os locais de extração. A região do Bonfim apresentou total equivalência e Mucajaí e Claudia apresentaram índice de equivalência igual a 93% em ambas as análises.

A maioria dos modelos de regressão utilizados para estimar propriedades físicas e mecânicas de Angelim-Pedra em função da densidade aparente e da compressão paralela às fibras foram significativos pela análise de variância (ANOVA). No entanto, o coeficiente de determinação (R^2) de modelos significativos foi inferior a 50%, o que implica na impossibilidade de estimar propriedades de resistência em função da densidade aparente. Considerando a compressão paralela às fibras, duas propriedades foram consideradas significativas e apresentaram R^2 acima de 50%, o que indica a possibilidade de estimativa de f_{c90} e E_{c0} em função de f_{c0} .

As relações de valores característicos utilizados na caracterização simplificada da madeira encontrada nesta pesquisa foram superiores aos valores dispostos na Norma Brasileira ABNT NBR 7190. Demonstra que os resultados obtidos no presente estudo devem ser utilizados em uma nova revisão da referida Norma sobre as relações utilizadas para caracterização da madeira.

Como sugestão para pesquisas futuras, a análise de outras espécies quanto a influência da região de extração, pois como explanado nesta pesquisa, temos resultados distintos de acordo com as espécies analisadas. Sugere-se também a análise de modelos de regressão com a densidade, para estimar demais propriedades das madeiras, para madeiras coníferas de reflorestamento, tal ação pode facilitar o conhecimento das propriedades destas espécies e ampliar sua possibilidade de aplicação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, D. H.; SCALIANTE, R. M.; CHRISTOFORO, A. L.; VARANDA, L. D.; ROCCO, F. A. L.; DIAS, A. A.; CALIL JR., C. Tenacidade da madeira como função da densidade aparente. **Revista Árvore** (Impresso), v. 38, p. 203-207, 2014.

ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; CHAHUD, E.; BRANCO, L. A. M. N.; LAHR, F. A. R. Density as Estimator of Strength in Compression Parallel to the Grain in Wood. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, p. 67-71, 2016a.

ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; CHAHUD, E.; BRANCO, L. A. M. N.; LAHR, F. A. R. Density as Estimator of Strength in Compression Parallel to the Grain in Wood. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, p. 67-71, 2016.

ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; MARCOLIN, L. A.; GONCALVES, D.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO, F. A. L. Correlation between Dry Density and Volumetric Shrinkage Coefficient of Three Brazilian Tropical Wood Species. **International Journal of Materials Engineering**, v. 5, p. 50-63, 2015.

ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AMBIENTE BRASIL. Desmatamento. Ambiente Brasil S/S Ltda. [cited 2010 fev. 4]. Available from: <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./florestal/index.html&conteudo=./florestal/artigos/desmatamento.html>.

AQUINO, Vinicius Borges de Moura. Análise das relações entre propriedades físicas e mecânicas em diferentes regiões de extração da madeira de Cambará (*Erisma Uncinatum* Warm). 2019.

ASSAD, Amanda Aparecida Vianna et al. Effect of provenances on wood properties of *Balfourodendron riedelianum*. **Madera y Bosques**, v. 26, n. 1, 2020.

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

ARAÚJO, R.F., E.A.T. MATRICARDI, M.E. NAPPO, 2012: Zoneamento ecológico de pequena escala para espécies florestais tradicionais no Distrito Federal. – **Floresta** 42, 421–430.

BARBOSA RI, PINTO DOS SANTOS F, CAMPOS DE SOUZA C. Desmatamento em Roraima: dados históricos e distribuição espaço-temporal. Boa Vista: Núcleo de Pesquisas de Roraima / Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia INPA; 2008. 10 p. Relatório Técnico.

BEECH, E. et al.. Global Tree Search - the first complete global database of tree species and country distributions. **Journal of Sustainable Forestry**. DOI: 10.1080/10549811.2017.1310049.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMA & Serviço Florestal Brasileiro – SFB. Florestas do Brasil em resumo (Relatório). Dados de 2007-2012. Brasília, DF: MMA e SFB, 2013, p. 50.

CAVALHEIRO, R. S.; ALMEIDA, D. H.; ALMEIDA, T. H.; ARAUJO, V. A.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Mechanical Properties of Paricá Wood Using Structural Members and Clear Specimens. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, p. 56-59, 2016.

CAVALHEIRO, R. S.; ALMEIDA, D. H.; ALMEIDA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Density as Estimator of Shrinkage for Some Brazilian Wood Species. *International Journal of Materials Engineering*, v. 6, p. 107-112, 2016.

CAPELLA, Ana Cláudia. Perspectivas teóricas sobre o processo de formulação de políticas públicas. *Revista Brasileira de Informação Bibliográfica em Ciências Sociais* – BIB, v. 61, p. 25-52, 2006. p. 26-30.

CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; SANTOS, J. C.; PANZERA, T. H.; LAHR, F. A. R. Shrinkage for Some Wood Species Estimated by Density. *International Journal of Materials Engineering*, v. 6, p. 23-27, 2016..

CHRISTOFORO, A. L.; SILVA, S. A. M.; PANZERA, T. H.; ROCCO, F. A. L. Estimative of Wooden Toughness by the Apparent Density and Bending Strength. *International Journal of Materials Engineering*, v. 4, p. 49-55, 2014.

CORRÊA, Manuel Pio. Dicionário de plantas úteis do Brasil e das exóticas cultivadas. In: *Dicionário de Plantas úteis do Brasil e das Exóticas Cultivadas*. Imprensa Nacional Brasília, 1984.

CSORDÓS, D. , R. NÉMETH, M. BAK, Variation of colour properties between and within New Robinia varieties with enhanced growing rates from different sites, *BioResources*. 9 (2014) 7099–7108. doi:10.15376/biores.9.4.7099-7108.

DA SILVA, Carlos Eduardo Gomes et al. Influence of the procurement site on physical and mechanical properties of Cupiúba wood species. **BioResources**, v. 13, n. 2, p. 4118-4131, 2018.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e de rigidez da madeira através da densidade aparente. *Scientia Forestalis (IPEF)*, v. 65, p. 102-113, 2004.

FEMA. Relatório dos resultados alcançados na implementação do sistema de controle ambiental de propriedades rurais no Estado do Mato Grosso. Cuiabá, Fundação Estadual do Meio Ambiente (Fema), Governo do Estado do Mato Grosso, 2002.

FERREIRA, G. C.; GOMES, J. I.; HOPKINS, M. J. G.; Estudo anatômico das espécies de Leguminosae comercializadas no estado do Pará como “angelim”. *Acta Amazônia* 2004, 34, 3: 387 – 398.

GENTRY A (1982) Patterns of neotropical plant species diversity. *Evolutionary Biology* 15: 1–84.

GENTRY A (1988) Tree species richness of upper Amazonian forests. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 85: 156–159

GONÇALVES, J.L.M., C.A. ALVARES, A.R. HIGA, L.D. SILVA, A.C. ALFENAS, J. STAHL, S.F.B. FERRAZ, W.P. LIMA, P.H.S. Brancalion, A. Hubner, J.P.D.Ouillet, J.P. Laclau, Y. Nouvellon, D. Epron, 2013: Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. – Forest. Ecol. Manage. 301, 6–27.

HELLMEISTER, J. C. Madeiras e suas características. In.: Encontro Brasileiro em Madeiras em Estruturas de Madeira, I, São Carlos, 1983. São Carlos. Anais, São Carlos: USP, EESC, SET, LaMEM, 1983.

HUMPHREYS, R. D.; CHIMELO, J. P. Comparação entre propriedades físicas, mecânicas e estereológicas para o agrupamento de madeiras. In: Congresso Nacional sobre Essências Nativas, 2, São Paulo. Anais, São Paulo, p. 480-490, 1992.

ICIMOTO, F. H.; FERRO, F. S.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L. ; ROCCO, F. A. L. Influence of Specimen Orientation on Determination of Elasticity in Static Bending. Maderas. Ciencia y Tecnología (Impresa), v. 17, p. 229-238, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), portal de consultas http://www.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm. Acessado em 08/12/2016 às 8:00 horas.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). Catálogo de Madeiras Brasileiras para a Construção Civil. Publicação IPT; 4371, 104 p., ISBN: 978-85-09-00175-9, 2013.

JURCA, J., 2005: Classificações climáticas: variações temporo- espaciais e suas aplicações nos livros didáticos e como subsidio ao zoneamento agroclimático. Dissertation. – Univ. Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, Brasil, 100 pp.

JUVENAL, T. L.; MATTOS, L. L. G. O setor florestal no Brasil e a importância do reflorestamento. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 16, p. 3-30, 2002.

KAIMOWITZ, D.; MERTENS, B.; WUNDER, S. e PACHECO, P. "Hamburger Connection Fuels Amazon Destruction". Bangor, Indonesia, Center for International Forest Research, 2004. http://www.cifor.cgiar.org/publications/pdf_files/media/Amazon.pdf.

LAURANCE, W. F. "Reflections on Tropical Deforestation crisis". *Biological Conservation*, n. 91, 1999, pp. 109-117.

LAURANCE, W. F.; COCHRANE, M. A.; BERGEN, S.; FEARNSIDE, P. M.; DELAMÔNICA, P.; BARBER, C.; D'ANGELO, S. e FERNANDES, T. "The Future of The Brazilian Amazon". *Science*, n. 291, 2001, pp. 438-439.

LOGSDON N.B., Dimensional Stability : Estimates Starting From the Basic Density, *Madeira Arquitetura e Eng.* 4 (2003).

LEMOS, André Luiz F.; SILVA, José de Arimatéia. Desmatamento na Amazônia Legal: evolução, causas, monitoramento e possibilidades de mitigação através do Fundo Amazônia. *Floresta e Ambiente*, v. 18, n. 1, p. 98-108, 2012.

MACHADO, José Saporiti et al. Variação da densidade da madeira e propriedades mecânicas da madeira preta (*Acacia melanoxylon* R. Br.). *Materials & Design* (1980-2015) , v. 56, p. 975-980, 2014.

MAHAR, D. J. Deforestation in Brazil's Amazon Region: Magnitude, Rate and Causes. New York, The World Bank, 1988. MARGULIS, S. "Quem são os agentes dos desmatamentos na Amazônia e por que eles desmatam?" Word Bank internal paper. 2002. http://www.obancomundial.org/index.php/content/view_folder/87.html].

MAPA de unidades de relevo do Brasil. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. Escala 1: 5000 000. Projeção policônica.

MEIRELLES, C. R. M. et al. Evolução das Coberturas em Madeira no Brasil. Equador, CLEFA: 2005.

MERTENS, B.; POCCARD-CHAPUIS, R.; PIKETTY, M.-G.; LACQUES, A.-E. e VENTURIERI, A. "Crossing Spatial Analyses and Livestock Economics to Understand Deforestation Processes in the Brazilian Amazon: The Case of São Félix do Xingu in South Pará". *Agricultural Economics*, n. 27, 2002, pp. 269-294.

MALHI, Yadvinder et al. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science*, v. 319, n. 5.860, p. 169-172, 2008.

MONTIEL, F. Programa áreas protegidas da Amazônia arpa. Resumo Executivo, 2004. <http://www.mma.gov.br/port/sca/ppg7/doc/arpareex.pdf> MORAN, E. F. "Deforestation and Land Use in the Brazilian amazon". *Human Ecology*, n. 21, 1993, pp. 1-21.

MONTGOMERY, D.C. ,Design and analysis of experiments, 2012.

LAHR, F. A. R.; AFTIMUS, B. H. C.; ARROYO, F. N.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; CHAHUD, E.; BRANCO, L. A. M. N. Full Characterization of *Vatairea* sp Wood Specie, *International Journal of Materials Engineering*, v. 6, n. 3, p. 92-96, 2016a.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, M. Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaio não-destrutivo utilizando equipamento de ultrassom. *Madeira: Arquitetura e Engenharia*, São Carlos (SP), v. 3, n. 8, p. 1-25, 2002.

OLIVEIRA, J. T. S. Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil. Tese (Doutorado). Departamento de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.

OLIVEIRA, Luciana Santos de. Estudo químico e biológico da madeira de lei *Hymenolobium Petraeum* (Angelim pedra) / Luciana Santos de Oliveira. - Recife: O Autor, 2011.xvii, 133 f.: fig. tab.

PPCDAm. Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento da Amazônia Legal. Fase I. Brasília, DF: Casa Civil, 2004.

RIBEIRO, Edilene Silva. Propriedades tecnológicas de vinte espécies de madeiras tropicais comercializadas pelo estado de Mato Grosso, 1999.

ROCCO, F. A. L.; Christoforo, A. L.; Silva, C. E. G.; Andrade Jr., J. R.; Pinheiro, R. V. Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de madeiras de Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa* Hayne) com diferentes teores de umidade e extraídas de regiões distintas. *Revista Árvore (Online)*, v. 40, p. 147-154, 2016.

RODRIGUES, D. A.; SILVEIRA, A. P.; CASTELLO, P. A. R. Determination Of Physical And Mechanical Properties Of The Wood Of Five Wooden Species From Southern Amazon. *Scientific Electronic Archives*, v. 7, n. unknown, p. 52-58, 2014.

ROMAGNOLI, M. , D. CAVALLI, S. SPINA, Wood Quality of Chestnut: Relationship between Ring Width, Specific Gravity, and Physical and Mechanical Properties, *BioResources*. 9 (2014) 1132–1147. doi:10.15376/biores.9.1.1132-1147.

RUELLE, J. , J. BEAUCHÊNE, H. YAMAMOTO, B. THIBAUT, Variations in physical and mechanical properties between tension and opposite wood from three tropical rainforest species, *Wood Sci. Technol.* 45 (2011) 339–357. doi:10.1007/s00226-010-0323-9.

SECTMA. GOVERNO DO ESTADO DO ACRE. Programa Estadual de Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre. Zoneamento ecológico-econômico: recursos naturais e meio ambiente – documento final. Rio Branco, vol. 1, 2000, 116 p.

SILVA, José Natalino Macedo. Manejo florestal. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI; Belém, PA: EMBRAPA-CPATU, 1996., 1996.

SHIMOYAMA, V. R.; Barrichelo, L. E. G. Influência das características anatômica e químicas sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* spp. In: Congresso Anual de Celulose e Papel, 24, São Paulo. Anais, São Paulo: ABTCP, 1991.

SOARES-FILHO, BRITALDO SILVEIRA et al. Cenários de desmatamento para a Amazônia. Estudos Avançados, v. 19, n. 54, p. 137-152, 2005.

VALENCIA R, BALSLEV H AND PAZ Y MIÑO CG (1994) High tree alpha-diversity in Amazonian Ecuador. Biodiversity and Conservation 3: 21–28.