

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL**

**ARTHUR KRAINER EIDT
RODRIGO BLEY RAITANI MERLIN
ROMÃO CAPELLAZZI**

**OBTENÇÃO DO VALOR DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA
MADEIRA POR MEIO DE ENSAIOS EXPEDITOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2014

**ARTHUR KRAINER EIDT
RODRIGO BLEY RAITANI MERLIN
ROMÃO CAPELLAZZI**

**OBTENÇÃO DO VALOR DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA
MADEIRA ATRAVÉS DE ENSAIOS EXPEDITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção Civil, do Departamento Acadêmico de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Prof. Dra. Elisabeth Penner

CURITIBA

2014

FOLHA DE APROVAÇÃO

OBTENÇÃO DO VALOR DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA MADEIRA POR MEIO DE ENSAIOS EXPEDITOS

Por

ARTHUR KRAINER EIDT, RODRIGO BLEY RAITANI MERLIN, ROMÃO
CAPELLAZZI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 21 de março de 2014, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – Elisabeth Penner, Dra.
UTFPR

Prof. Wellington Mazer, Dr.
UTFPR

Eng. Christopher Bernardi Scremim.

RESUMO

O presente trabalho sugere a determinação do módulo de elasticidade através de ensaios expeditos. Foram utilizadas 4 espécies de madeira presentes no Brasil para os experimentos, sendo eles realizados com corpos de prova em umidade natural e saturada. Os ensaios utilizados foram de flexão simples reta e ultrassom. Os resultados mostram a eficácia do método de flexão simples reta, o qual é simples na execução e nos equipamentos empregados, tornando execução em campo mais viável, enquanto o ultrassom fornece resultados satisfatórios com a madeira em umidade natural, em contrapartida, os resultados com a madeira saturada levantam uma nova hipótese de tratamento de dados.

Palavras-chave: Módulo de Elasticidade, Ensaio não destrutivo, Norma Brasileira. Madeira.

ABSTRACT

This work suggests the determination of the modulus of elasticity through expeditious tests. Four Brazilian wood species were used on the tests, with natural and saturated humidity specimens. The tests were of simple straight flexion and ultrassound. The results show the efficacy of the simple straight flexion method, which is simple in its execution and necessary equipment, making its use on the field more viable, whereas the ultrassound supplies satisfactory results with wood in natural humidity, on the other hand, the results with the saturated wood specimens raise the need for a new data processing hypothesis.

Keywords: Module of elasticity, non-destructive test, Brazilian Standard. Wood.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Nó, provocando inclinação nas fibras.....	18
Figura 2 - Fendas periféricas e fendas no cerne.....	19
Figura 3 – Abaulamento.....	19
Figura 4 - Quina morta.....	20
Figura 5 – Diagrama de tensão normal x deformação específica.....	21
Figura 6-Esquema para extração de corpos de prova das peças.....	22
Figura 7–Diagrama momento x deslocamento no meio do vão.....	25
Figura 8 – Representações do corpo de prova (em cm).....	32
Figura 9 – Representações do corpo de prova (em cm).....	33
Figura 10 – Fluxograma de ensaio de flexão simples reta.....	36
Figura 11 – Fluxograma de ensaio de ultrassom.....	38

LISTA DE IMAGENS

Imagem 1 – Corpos de prova de cedro	28
Imagem 2 – Corpos de prova de peroba.....	29
Imagem 3 – Corpos de prova Araucária.....	30
Imagem 4 – Corpos de prova de Pinus.....	30
Imagem 5 – Ensaio de flexão simples reta.....	34
Imagem 6 – Ensaio de Ultrassom.	37

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classes de Resistência das Coníferas.	14
Quadro 2 – Classes de Resistência das Dicotiledôneas.	14
Quadro 3 – Classes de Umidade.	15
Quadro 4 – Valores do Coeficiente de correção α	18
Quadro 5 – Valores médios das características da madeira.	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados.	39
Tabela 2 – Relação do módulo de elasticidade calculado com o referência.	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS.....	11
1.1.1 Objetivo Geral.....	11
1.1.2 Objetivos específicos	11
1.2 JUSTIFICATIVA.....	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA.....	13
2.2 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA SEGUNDO A NBR 7190 (ABNT, 1997) ...	13
2.2.1 Generalidades.....	13
2.2.2 Resistências Mecânicas	13
2.2.2.1 Classificação	13
2.2.3 Umidade	14
2.2.4 Rigidez.....	15
2.2.5 Condições de Referência.....	16
2.3 DEFEITOS	18
2.3.1 Nós	18
2.3.2 Fendas.....	18
2.3.3 Abaulamento.....	19
2.3.4 Quina Morta	19
2.3.5 Deterioração da Madeira	20
2.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE	20
2.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	21
2.5.1 Amostragem.....	22
2.5.2 Umidade	23
2.5.3 Ensaio de Flexão Estática Simples Reta	23
2.5.4 Ensaio via ultrassom.....	25
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	27
3.1 ESPÉCIES DE MADEIRA.....	27
3.1.1 Cedro	27
3.1.2 Peroba Rosa.....	28
3.1.3 Araucária	29
3.1.4 Pinus.....	30
3.2 VALORES MÉDIOS DAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA.....	30
3.3 DEFINIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	32
3.4 QUANTIFICAÇÃO DE AMOSTRAS.....	32
3.5 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	33
3.6 CORREÇÃO DA UMIDADE.....	33
3.7 ENSAIOS.....	33

3.7.1 Ensaio de Flexão Simples Reta	34
3.7.2 Ensaio de Ultrassom.....	37
3.8 RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA E MÓDULO DE ELASTICIDADE	38
4 RESULTADOS	39
5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	40
6 CONCLUSÕES	41
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	42
REFERÊNCIAS.....	43
APÊNDICE.....	45

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um dos mais antigos materiais utilizados pelo homem, seja para a fabricação de ferramentas quanto para a construção, isso se deve a sua grande disponibilidade e facilidade de manuseio. No Brasil a madeira é utilizada para muitas finalidades, somente na construção civil é possível listar muitas delas, como a estrutura propriamente dita, tais como, pilares, vigas, telhados, pontes, vedação e estruturas provisórias tais como formas e escoras, no acabamento, forros, pisos, portas, janelas e na decoração painéis e mobiliários. (ZENID, 2010).

Mesmo tendo essa gama de finalidades a madeira ainda é mal aproveitada devido à divulgação insuficiente de informações tecnológicas e falta de projetos específicos (CALIL JUNIOR, 2003).

Um dos aspectos mais importantes da madeira é sua alta resistência em relação à densidade, comparada a outros materiais de construção convencionalmente utilizados como o concreto, também é importante a facilidade de execução e conforto térmico que o material apresenta. Ainda lembrando que a madeira está sujeita a degradação por elementos xilófagos, por isso deve ser tratada e periodicamente receber uma manutenção para que sua durabilidade não seja comprometida (PFEIL, 2003).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é o de obter o módulo de elasticidade longitudinal da madeira seca e saturada por meio de ensaios estáticos de flexão simples reta e ensaios de ultrassom.

1.1.2 Objetivos específicos

- a. Realizar ensaios de flexão simples reta para obtenção do módulo de elasticidade com a utilização de arranjos e equipamentos que sejam de fácil e simples montagem.

- b. Discutir a relação entre a velocidade de propagação de ondas na madeira seca e saturada e seu respectivo módulo de elasticidade.
- c. Comparar os valores de módulo de elasticidade obtidos por meio dos ensaios com aqueles especificados na NBR 7190 (ABNT, 1997).
- d. Encontrar uma relação entre o módulo de elasticidade da madeira com a classe de resistência.
- e. Confirmar o valor de redução da resistência da madeira saturada (0,65) existente na NBR 7190 (ABNT, 1997).

1.2 JUSTIFICATIVA

Na NBR 7190 (ABNT, 1997), estão especificados ensaios de caracterização com base em determinação de resistências e de módulos de elasticidade axiais na tração ou compressão.

Devido aos ensaios serem de compressão paralela às fibras, deve-se descartar o início da curva tensão x deformação, para eliminar o efeito de acomodação das fibras, e o final para eliminar a não linearidade da proximidade da ruptura. No caso de tração axial normatizado encontra-se grande dificuldade para a confecção do corpo de prova, visto que se faz necessário o uso de um torno além de apresentar a mesma dificuldade para a obtenção do módulo.

Pela quantidade de incertezas gerada e dificuldade de realização do ensaio previsto na NBR 7190 (ABNT, 1997), viu-se a oportunidade de realizar ensaios de flexão simples reta e ultrassom, além disso, pelos ensaios não serem destrutivos é possível realizar ambos os ensaios secos e saturados com os mesmos corpos de prova.

Os métodos para ensaios empregados neste trabalho são de fácil e simples montagem. Com isso, os ensaios podem ser realizados com rapidez e eficácia e de uma maneira confiável em uma situação de campo, para se obter o módulo de elasticidade e relaciona-lo com a classe de resistência conforme NBR 7190 (ABNT, 1997).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

Segundo a NBR 7190/97, as propriedades da madeira são condicionadas por sua estrutura anatômica, portanto a análise de valores deve ser distinta para a compressão e tração, bem como para a direção paralela às fibras e normal às fibras. Deve também se distinguir os valores correspondentes as diferentes classes de umidade, conforme umidade de equilíbrio relacionado à umidade ambiente.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA SEGUNDO A NBR 7190 (ABNT, 1997)

2.2.1 Generalidades

Na NBR 7190 (ABNT, 1997), estão definidas as principais diretrizes de como deve ser projetado e dimensionado uma estrutura total ou parcial em madeira. Dentro das estruturas contempladas pode-se ressaltar: pontes, pontilhões, coberturas, pisos e cimbramento.

Para a execução de um projeto a norma define a necessidade da elaboração de dois documentos essenciais e um opcional, são eles: Memorial Justificativo, Desenhos e Plano de Execução.

2.2.2 Resistências Mecânicas

2.2.2.1 Classificação

Para elaboração de projetos de estruturas em Madeira a NBR 7190 (ABNT, 1997), divide as espécies de madeira em classes de resistência e também divide com relação ao gênero, coníferas e dicotiledôneas.

As coníferas são classificadas em C20, C25 e C30, enquanto as dicotiledôneas são classificadas em C20, C30, C40 e C60. Sendo consideradas, nas classes de resistência da madeira: a resistência à compressão paralela às fibras, a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, o módulo de elasticidade na

compressão paralela às fibras e a densidade aparente, que relaciona os valores de massa da madeira a 12% de umidade e volume da madeira a 12% de umidade. O enquadramento das classes de resistência está evidenciado nos Quadro 1 e 2.

Coníferas (Valores na condição-padrão de referência U=12%)				
Classes	$f_{c0,k}$ MPa	$f_{v0,k}$ MPa	$E_{c0,m}$ MPa	$\rho_{aparente}$ kg/m ³
C20	20	4	3500	500
C25	25	5	8500	550
C30	30	6	14500	600

Quadro 1 – Classes de Resistência das Coníferas.

Fonte: NBR 7190/97, adaptado pelos autores.

Dicotiledôneas (Valores na condição-padrão de referência U=12%)				
Classes	$f_{c0,k}$ MPa	$f_{v0,k}$ MPa	$E_{c0,m}$ MPa	$\rho_{aparente}$ kg/m ³
C20	20	4	9500	650
C30	30	5	14500	800
C40	40	6	19500	950
C60	60	8	24500	1000

Quadro 2 – Classes de Resistência das Dicotiledôneas.

Fonte: NBR 7190/97, adaptado pelos autores.

Onde:

$f_{c0,k}$ – resistência característica à compressão paralela às fibras;

$f_{v0,k}$ – resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras;

$E_{c0,m}$ – módulo de elasticidade longitudinal médio;

$\rho_{aparente}$ – densidade aparente.

2.2.3 Umidade

Na NBR 7190 (ABNT, 1997) é estabelecido uma classificação em relação à umidade da madeira com o propósito de ajustar as características de resistência e rigidez devido às condições adversas do ambiente, ao qual o material está exposto.

O k_{mod2} , relaciona o nível de saturação do ambiente ao qual a estrutura da madeira estará exposta, gerando assim uma alteração da resistência da madeira e do módulo de elasticidade.

O coeficiente de modificação k_{mod2} é dado pela relação entre a propriedade da madeira em estado de umidade normal (12%).

$$f_{m,sat} = f_{m,12\%} k_{mod2} \quad (1)$$

Onde:

f_{12} valor da madeira saturada;

$f_{m,12\%}$ valor na umidade normal 12%;

k_{mod2} é o coeficiente de modificação.

A classificação em relação à umidade é dividida em quatro classes, são elas: Classe 1, Classe 2, Classe 3 e Classe 4. São consideradas nas classes de umidade da madeira: umidade relativa do ambiente e umidade de equilíbrio da madeira. O enquadramento das classes de umidade está evidenciado no Quadro 3, juntamente com o respectivo valor do coeficiente de minoração k_{mod2} .

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Umidade de equilíbrio da madeira U_{eq}	k_{mod2}
1	$U_{amb} \leq 65\%$	12%	1,0
2	$65\% < U_{amb} < 75\%$	15%	1,0
3	$75\% < U_{amb} < 85\%$	18%	0,8
4	$U_{amb} > 85\%$ durante longos períodos	$\geq 25\%$	0,8

Quadro 3 – Classes de Umidade.

Fonte: NBR 7190/97, adaptado pelos autores.

Além dos valores existentes no Quadro 3, a NBR 7190 (ABNT, 1997) confere o valor para k_{mod2} igual a 0,65 para a madeira submersa, ou seja, em situação de total saturação.

2.2.4 Rigidez

A NBR 7190 (ABNT, 1997) estabelece como rigidez o valor médio do módulo de elasticidade na fase comportamental elástico-linear da madeira. São

evidenciados dois principais tipo de módulo de elasticidade, o E_{w0} na direção paralela às fibras e o E_{w90} na direção perpendicular as fibras.

No entanto, quando é inexistente a determinação do valor experimental de E_{w90} , a norma permite a seguinte adoção:

$$E_{w90} = \frac{1}{20} E_{w0} \quad (2)$$

Onde:

E_{w90} – módulo de elasticidade, à compressão normal às fibras;

E_{w0} – módulo de elasticidade, à compressão paralela às fibras.

2.2.5 Condições de Referência

Os valores apresentados nos Quadros 1 e 2, de módulo de elasticidade e resistência, estão diretamente relacionados ao valor de umidade pertencente à Classe 1 no Quadro 3.

Portanto, quando existem diferenças tanto na umidade relativa do ambiente, quanto na umidade do equilíbrio da madeira, devem ser realizadas correções no módulo de elasticidade e na resistência. Essas correções são dadas pelas seguintes equações:

$$f_{12} = f_{u\%} \left[1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right] \quad (3)$$

$$E_{12} = E_{u\%} \left[1 + \frac{2(U\% - 12)}{100} \right] \quad (4)$$

Nas quais:

f_{12} - resistência da madeira, à solicitação considerada, ao teor de umidade de referência de 12%;

$f_{u\%}$ - resistência da madeira, à solicitação considerada, ao teor de umidade $U\%$;

$U\%$ - teor de umidade da madeira no instante do ensaio, em %;

E_{12} - módulo de elasticidade longitudinal, à compressão paralela às fibras, ao teor de umidade de referência de 12%;

$E_{u\%}$ - módulo de elasticidade longitudinal, à compressão paralela às fibras, ao teor de umidade $U\%$.

Lembrando que a influência da temperatura na madeira, na variação de 10°C a 60°C, é considerada desprezível.

Vale comentar que segundo um estudo realizado por Logsdon (1998) as equações 3 e 4 deveriam ser alteradas, apresentando então a seguinte formulação:

$$f_{12} = f_{u\%} \left[1 + \frac{\alpha(U\% - 12)}{100} \right] \quad (5)$$

$$E_{12} = E_{u\%} \left[1 + \frac{\alpha(U\% - 12)}{100} \right] \quad (6)$$

Nas quais:

f_{12} - resistência da madeira, à solicitação considerada, ao teor de umidade de referência de 12%;

$f_{U\%}$ - resistência da madeira, à solicitação considerada, ao teor de umidade U%;

U% - teor de umidade da madeira no instante do ensaio, em %;

E_{12} - módulo de elasticidade longitudinal, à compressão paralela às fibras, ao teor de umidade de referência de 12%;

$E_{U\%}$ - módulo de elasticidade longitudinal, à compressão paralela às fibras, ao teor de umidade U%;

α – coeficiente de correção, fornecido no Quadro 4.

Propriedade de resistência ou rigidez	Coeficiente de correção - α
Resistência à compressão paralela às fibras, f_{c0}	3,5
Resistência à tração paralela às fibras, f_{t0}	2
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, f_{v0}	2,5

Modulo de elasticidade longitudinal, E_{co}	2,5
---	-----

Quadro 4 – Valores do Coeficiente de correção α .
Fonte: Logsdon (1998).

2.3 DEFEITOS

São imperfeições que a madeira pode apresentar com as seguintes classificações:

2.3.1 Nós

Imperfeição da madeira nos pontos dos troncos onde existiam galhos. Os galhos ainda vivos na época do abate da árvore produzem nós firmes, enquanto os galhos mortos originam nós soltos. Os nós soltos podem cair durante o corte com a serra, produzindo orifícios na madeira. As fibras longitudinais, nos nós sofrem desvio de direção, ocasionando redução na resistência à tração (PFEIL, 2003).

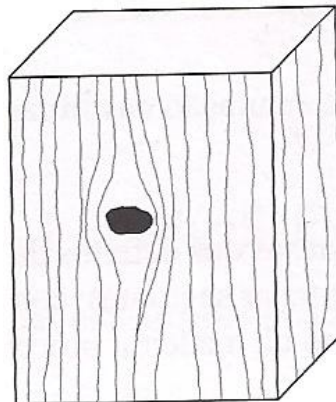


Figura 1 – Nó, provocando inclinação nas fibras.
Fonte: Estruturas de Madeira. Pfeil, Walter; Pfeil, Michèle; 6ª Ed. LTC, 2003.

2.3.2 Fendas

Aberturas nas extremidades das peças, produzidas pela secagem mais rápida da superfície. As fendas ficam situadas em planos longitudinais radiais, atravessando os anéis de crescimento. O aparecimento de fendas pode ser evitado mediante a secagem lenta e uniforme da madeira (PFEIL, 2003).

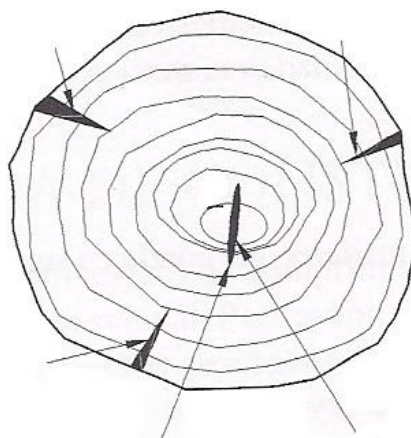


Figura 2 - Fendas periféricas e fendas no cerne.

Fonte: Estruturas de Madeira. Pfeil, Walter; Pfeil, Michèle; 6ª Ed. LTC, 2003.

2.3.3 Abaulamento

Encurvamento na direção da largura da peça (PFEIL, 2003).

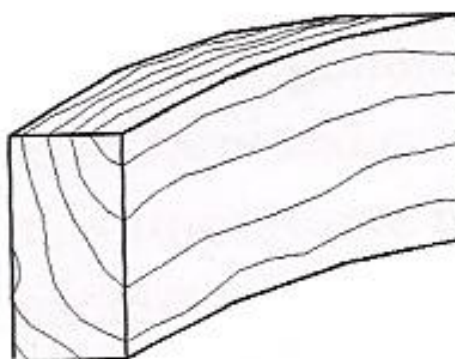


Figura 3 – Abaulamento.

Fonte: Estruturas de Madeira. Pfeil, Walter; Pfeil, Michèle; 6ª Ed. LTC, 2003.

2.3.4 Quina Morta

Canto arredondado, formado pela curvatura natural do tronco. A quina morta significa elevada proporção de madeira branca, albarno (PFEIL, 2003).

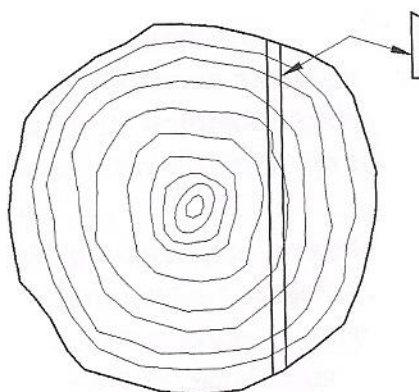


Figura 4 - Quina morta.

Fonte: Estruturas de Madeira. Pfeil, Walter; Pfeil, Michèle; 6ª Ed. LTC, 2003.

2.3.5 Deterioração da Madeira

A madeira está sujeita a deterioração de diversas origens, como o ataque biológico e ação do fogo. Fungos, cupins, moluscos e crustáceos marinhos são exemplos de agentes biológicos que se instalam na madeira para se alimentar de seus produtos. A vulnerabilidade da madeira de construção ao ataque biológico depende da camada do tronco de onde foi extraída a madeira, da espécie da madeira, das condições ambientais à que a madeira está exposta e da proteção que foi dada. Por ser combustível, a madeira é frequentemente considerada um material de pequena resistência ao fogo. Mas, ao contrario, as estruturas de madeira, quando adequadamente projetadas e construídas, apresentam ótimo desempenho sob a ação do fogo (PFEIL, 2003).

2.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE

As estruturas correntes são projetadas de modo a sofrerem apenas pequenas deformações, que não ultrapassem os valores do diagrama de tensão normal-deformação específica correspondentes ao regime elástico do diagrama. Na parte inicial do diagrama, a tensão σ é diretamente proporcional à deformação específica ε e segue a equação da lei de Hooke (BEER, 1995).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6)$$

E = Módulo de elasticidade,

σ = Tensão normal,

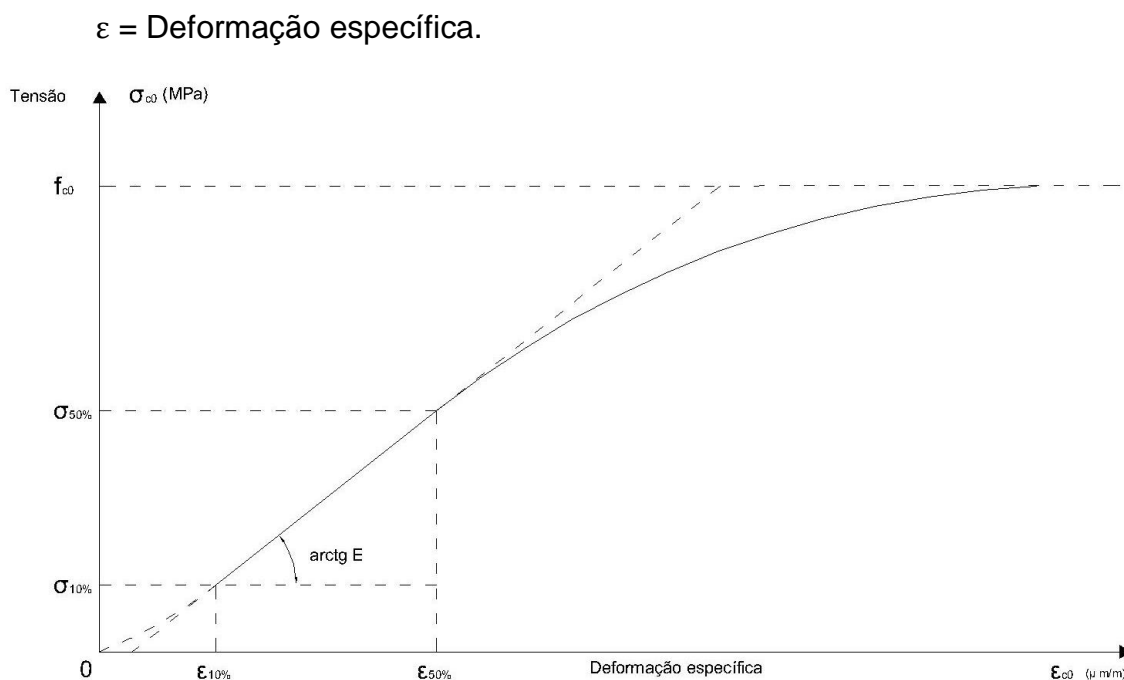


Figura 5 – Diagrama de tensão normal x deformação específica.
Fonte: NBR 7190 (1997, p. 51).

2.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Para a caracterização da madeira se faz necessário o uso de ensaios que determinam suas propriedades. Para o Brasil, os ensaios se encontram no Anexo B da NBR 7190/97 que contém os métodos de ensaios para caracterização das propriedades da madeira.

Segundo Pfeil (2003) dos ensaios padronizados obtêm-se as propriedades da madeira na umidade de padrão (12%). Sendo assim, é necessário que estes valores sejam corrigidos conhecendo-se diversos fatores, tais como: teor de umidade e defeitos na madeira.

De acordo com Melo (2010) se realizam os ensaios em corpos de prova de dimensões não estruturais, sendo eles assim livres de defeitos e de baixo custo com relação a peças de maiores tamanhos. Para a madeira, há necessidade de realizar sua caracterização em diversas situações de carregamento e uso, devido ao material ser considerado heterogêneo e anisotrópico.

Candian e Sales (2009) estudaram a aplicação de ensaios não destrutivos para a caracterização dessa propriedade, como o ultrassom, ondas de tensão e vibração transversal. A aplicação de métodos não destrutivos para a caracterização

é empregada com o objetivo de obter as propriedades desejadas do material estudado sem que seu uso seja comprometido.

Juntamente com o ensaio de flexão estática da madeira o de ultrassom foi utilizado neste trabalho com o intuito de determinação do módulo de elasticidade da madeira.

2.5.1 Amostragem

De acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997) os corpos de prova devem ser retirados de um mesmo lote de madeira serrada, sendo que o volume do lote para ser considerado homogêneo deve ser menor do que doze metros cúbicos. Os corpos de prova também devem ser removidos de peças diferentes. Além disso, devem ser livres de defeitos e extraídos longe das extremidades, em uma distância de pelo menos cinco vezes a menor dimensão ou trinta centímetros (Figura 6). São necessários seis corpos de prova para a caracterização simplificada e doze corpos de prova para a caracterização de espécies pouco conhecidas.

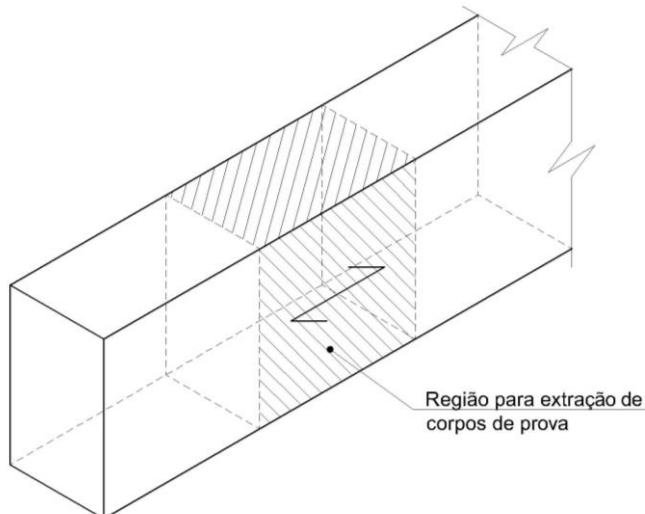


Figura 6-Esquema para extração de corpos de prova das peças.
Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997, p. 47).

Bertolini *et al.* (2010) estudaram a influência do tamanho dos corpos de prova na determinação do módulo de elasticidade da madeira. As espécies de madeira estudadas foram Canelão e Angelim, e foi constatado nesse estudo que a diferença entre os tamanhos dos corpos de prova não demonstraram interferir no valor da característica estatisticamente.

2.5.2 Umidade

Logsdon (1998) realizaram um estudo sobre a influência da umidade da madeira ao se determinar as características de resistência e rigidez, a fim de validar os coeficientes de correção proposto pela NBR 7190 (ABNT, 1997). Para o módulo de elasticidade, das sete espécies estudadas, em dois dos casos o modelo adotado pela NBR 7190 (ABNT, 1997) não era compatível.

A importância da determinação do teor de umidade da madeira se dá ao fato de que os valores obtidos nos ensaios realizados devem ser corrigidos. Segundo a NBR 7190/97 o ensaio obedece aos parâmetros previamente estabelecidos de amostragem e a seção transversal do corpo-de-prova deve ser retangular e ter dimensões 2,0 cm x 3,0 cm. O comprimento deve ser de 5 cm na direção longitudinal das fibras. NBR 7190 (ABNT, 1997) ainda recomenda que o método utilizado para secagem da madeira seja em estufa.

O teor de umidade (U) da madeira é calculado pela equação:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

$U(\%)$ - teor de umidade em porcentagem;

m_i - massa inicial da amostra;

m_s - massa seca da amostra.

2.5.3 Ensaio de Flexão Estática Simples Reta

A madeira sujeita a flexão simples apresenta as tensões de: compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento horizontal e compressão normal às fibras na região dos apoios. (CALIL JUNIOR *et al.*, 2003).

O ensaio de flexão estática simples reta da madeira tem como objetivo determinar seu módulo de rigidez e a tensão de ruptura. Os corpos de prova respeitam os parâmetros prévios de amostragem. As dimensões recomendadas por Norma são de 5,0 cm x 5,0 cm de seção transversal e 115 cm de comprimento. Pfeil (2003) explica que no ensaio de flexão, a carga é aplicada no meio do vão e com a utilização de ferramentas adequadas mede-se o deslocamento causado pela força

aplicada no meio do vão, para construir o diagrama momento x deslocamento (figura 7). No trecho inicial do diagrama, obtém-se o módulo de elasticidade por meio da inclinação do trecho linear, calculada pela equação:

$$E_m = \frac{(M_{50\%} - M_{10\%})}{\Delta\delta} \frac{l^2}{bh^3} \quad (8)$$

Onde:

E_m - módulo de elasticidade na flexão estática simples reta;

$M_{50\%}$ - momento fletor correspondente a 50% da carga máxima aplicada;

$M_{10\%}$ - momento fletor correspondente a 10% da carga máxima aplicada;

l - comprimento do vão;

b - base da seção transversal;

h - altura da seção transversal.

O momento fletor é obtido utilizando a carga aplicada durante a realização do ensaio, através da equação:

$$M = \frac{Pl}{4} \quad (9)$$

Nos quais:

M - momento fletor solicitante;

P - carga aplicada;

l - comprimento do vão.

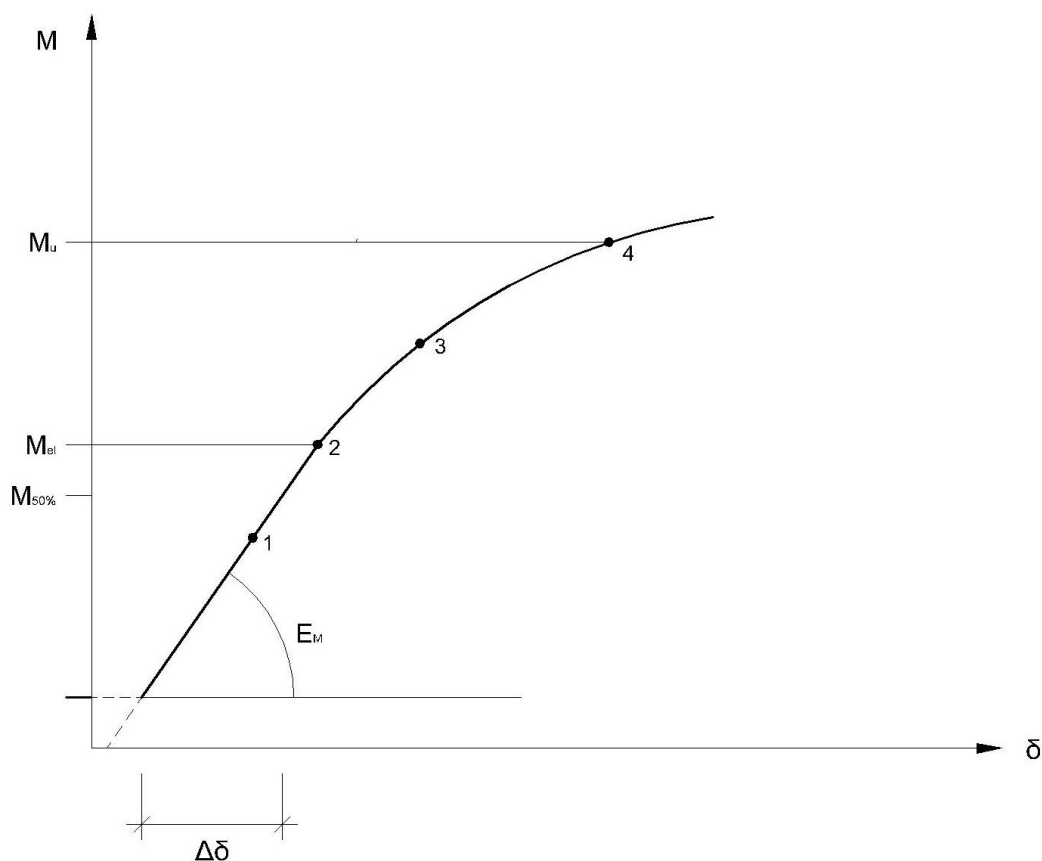


Figura 7—Diagrama momento x deslocamento no meio do vão.
Fonte: Estruturas de Madeira. Pfeil, Walter; Pfeil, Michèle; 6ª Ed. LTC, 2003.

2.5.4 Ensaio via ultrassom

A utilização do ultrassom para determinação indireta do módulo de elasticidade é um método de ensaio não destrutivo, além de ser rápido e prático o que caracteriza a abordagem no presente trabalho.

TOMSETT (1979, apud PENNER, 1997, p 85) afirma que a velocidade de propagação de ondas através de um corpo-de-prova ou qualquer meio físico, depende apenas da densidade e propriedades elásticas do material submetido às ondas.

MALHOTRA (1989, apud PENNER, 1997, p 86) relata que essencialmente três tipos de onda podem se propagar nos materiais sólidos. São elas: ondas superficiais ou de Rayleigh, ondas transversais “cisalhantes” e ondas longitudinais “compressivas”.

O método do ultrassom se baseia na obtenção do tempo que um pulso ultrassônico leva para percorrer uma distância já conhecida. Nesse caso específico, o comprimento do corpo-de-prova. O módulo de elasticidade pode ser determinado através da velocidade de propagação de ondas sonoras. A propagação é realizada através de pequenas deformações que se propagam ao longo do material (MONTE *et al.*, 2011).

Monte (2011) define que a velocidade de propagação de ondas longitudinais, através de um meio sólido, é calculada por:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (10)$$

Onde:

V = velocidade de propagação de onda (km/s);

E = módulo de deformação do material (MPa);

ρ = massa específica do material (kg/m³).

MALHOTRA (1989, apud PENNER, 1997, p 87) salienta que para materiais heterogêneos como concreto e madeira, para a realização do ensaio, devem ser utilizados pulsos de baixa frequência, pois altas frequências resultam no atenuamento dos pulsos quando percorrem o corpo-de-prova.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 ESPÉCIES DE MADEIRA

Para a investigação experimental desse trabalho foram escolhidas 4 espécies de madeira, duas dicotiledôneas e outras duas coníferas, onde cada uma representa uma resistência característica diferenciada entre as espécies, além de uma angiosperma e outra gimnosperma com a mesma resistência.

3.1.1 Cedro

O nome cedro é dado a varias madeiras com cheiro agradável, semelhantes ao cedro verdadeiro que é uma gimnosperma. A mais conhecida de todo do gênero Cedrus sp. é a espécie Cedrela odorata que é originária da América do Sul e Central. Outras Angiospermas muito similares são originárias da Austrália e do sudoeste da Ásia, o que leva a crer que no passado se incluíam no gênero Cedrela, e atualmente formam o Gênero Toona sp..A madeira possui uma textura espessa sendo muito mais leve que a maioria das outras angiospermas, algumas vezes é resinosa. O peso e a cor variam consideravelmente devido às condições de crescimento. A madeira do falso cedro, como também pode ser chamada, reúne uma boa combinação das propriedades técnicas. Seca rapidamente, e uma vez seca é muito estável, é forte, não é muito dura nem pesada, fácil de trabalhar, além de ser muito duradora e resiste bem aos ataques biológicos (LA MADERA, 1980).



Imagem 1 – Corpos de prova de cedro
Fonte: Aatoria própria.

3.1.2 Peroba Rosa

Uma árvore perenifólia, com 15 a 25 m de altura em média, que pode atingir até 50 m de altura na idade adulta. Tem um tronco cilíndrico, reto ou levemente tortuoso, Casca grossa, com espessura de até 50 mm. No Brasil ocorre de forma natural principalmente no norte do Paraná. Dentre as espécies de angiospermas é a de maior valor econômico, Atualmente toda a madeira utilizada no Brasil é importada do Paraguai onde ainda é abundante e pouco utilizada. A madeira de peroba-rosa, por ser de resistência mecânica e retratibilidade média, era muito usada na indústria de móveis e indicada, principalmente, na construção civil para caibros, ripas, forro, marcos de portas e janelas. (CARVALHO, 2004).



Imagem 2 – Corpos de prova de peroba.
Fonte: Autoria própria.

3.1.3 Araucária

A araucária é uma madeira extraída principalmente do estado do Paraná, mas é distribuída em regiões do Paraguai e norte da Argentina. É uma árvore de tamanho médio a grande, de até 40m de altura, com um tronco largo e reto e uma copa plana. A espécie tem uma madeira de cor pálida ou bege em que, ocasionalmente, aparecem veios vermelho brilhante. Tem uma textura bastante fina e uniforme, consequência da quase inexistência de anéis de crescimento. Seu peso é semelhante ao do pino Albar. Trata-se de uma madeira de difícil secagem, requerendo grandes precauções para evitar o empenamento e fendilhamento, é forte, facilmente cerrada e trabalhada bem manualmente. Adquire um bom acabamento, mas não é uma madeira durável (LA MADERA, 1980).



Imagem 3 – Corpos de prova Araucária.
Fonte: autoria própria.

3.1.4 Pinus

O pinus, que é a conífera comercial mais plantada no Brasil e no mundo tem o gênero formado por uma larga quantidade de espécies *Pinus sp.* É uma madeira que pode variar muito entre as espécies, podendo assumir tons amarelo, pardo ou avermelhado, com anéis de crescimento bem definidos, e frequentemente é muito resinosa. É uma madeira que se seca lentamente e tem certa tendência de partir-se, sua resistência varia bastante entre as espécies, mas no geral é uma madeira resistente se confrontada com seu peso específico, além de ser bem trabalhável (LA MADERA, 1980).



Imagem 4 – Corpos de prova de Pinus.
Fonte: Autoria própria.

3.2 VALORES MÉDIOS DAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA

No quadro 5 estão apresentados valores médios para resistências a compressão e tração, assim como cisalhamento. Os valores na coluna de E_{c0} são valores esperados nos ensaios deste trabalho.

Nome comum	Nome Científico	Classe da Madeira	ρ_{ap} (15%) (kg/m ³)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{t90m} (MPa)	f_{vm} (MPa)	E_{c0m} (MPa)
Araucária	<i>Araucaria angustifolia</i>	C30	550	40,9	93,1	1,6	8,8	10719
Pinus	<i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	C30	480	40,4	66	2,5	7,4	6463
Cedo doce	<i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	C20	500	31,5	71,4	3	5,6	8058
Peroba-Rosa	<i>Aspidospermum lyneuron</i>	C60	790	88,2	23,3	8,1	11,9	9248

Quadro 5 – Valores médios das características da madeira.

Fonte: NBR 7190/97 e MADEIRA.

$\rho_{ap}(15\%)$ é a massa específica aparente a 15% de umidade;

f_{c0} é a resistência à compressão paralela às fibras;

f_{t0} é a resistência à tração paralela às fibras;

f_{t90} é a resistência à tração normal às fibras;

f_v é a resistência ao cisalhamento;

E_{c0} é o módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras.

Conforme a NBR 7190/97 os valores para f_{c0k} são obtidos utilizando o valor de f_{c0m} através da equação:

$$f_{c0k} = f_{c0m}(1 - 1,645\delta) \quad (11)$$

Onde:

f_{c0k} é resistência a compressão característica

f_{c0m} é resistência a compressão média

δ é o coeficiente de variação das resistências

Como a madeira é um material sujeito a diversas variações naturais que podem interferir em suas propriedades, adota-se um coeficiente de variação pessimista, a favor da segurança, δ de 18%. Assim a equação (11) simplifica-se na equação a seguir:

$$f_{c0k} = f_{c0m}0,7 \quad (12)$$

3.3 DEFINIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para melhor evidenciar a interação da resistência com o módulo de elasticidade, foram escolhidas 4 espécies de madeira, 2 dicotiledôneas e 2 coníferas, arbitradas de acordo com os extremos das classes de resistência estabelecidas na NBR 7190 (ABNT, 1997). As madeiras escolhidas são apresentadas no Quadro 5.

3.4 QUANTIFICAÇÃO DE AMOSTRAS

De acordo com os critérios de amostragem citados no referencial teórico foi definido a utilização de 6 corpos de prova de cada espécie, já que as madeiras adotadas são de espécies conhecidas.

Para melhor manuseio, execução e obtenção, o tamanho dos corpos de prova adotados será de 30cmx3cmx1cm.

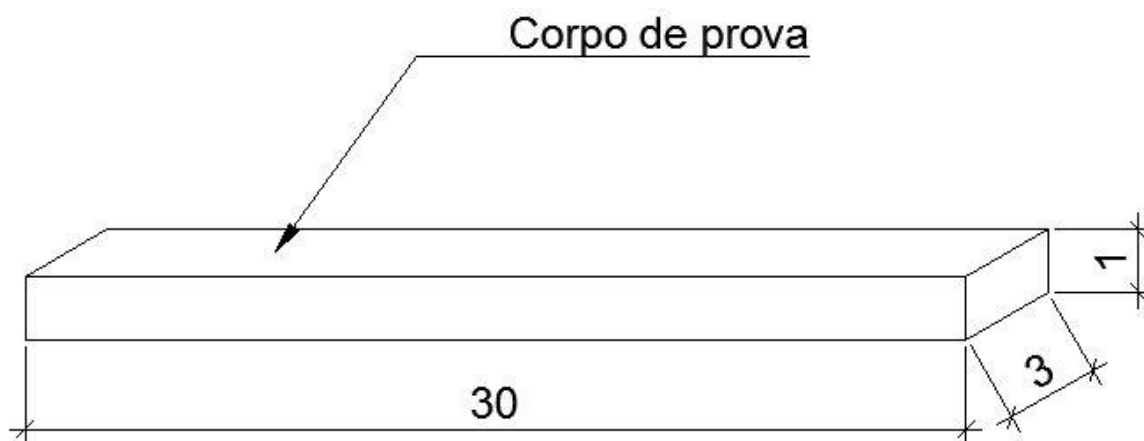


Figura 8 – Representações do corpo de prova (em cm).
Fonte: Autoria própria.

Para os ensaio de ultrassom foram utilizados 2 corpo-de-prova de cada espécie de madeira com dimensões de 30cmx5cmx5cm.

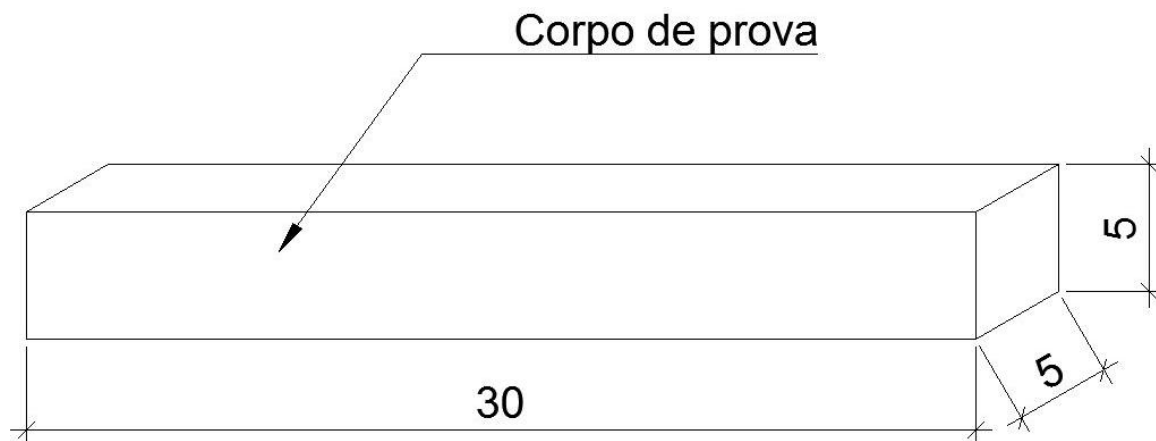


Figura 9 – Representações do corpo de prova (em cm).
Fonte: Autoria própria.

3.5 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

- Carregamento – pesos com massa de 1 kilograma;
- PUNDIT – “*Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Teste*”, gerador de pulsos ultra-sônicos de baixa frequência;
- Suporte com eletroímã, marca MITUTOYO;
- Transdutor de deslocamento tipo mecânico, marca MITUTOYO.

3.6 CORREÇÃO DA UMIDADE

Para a correção da umidade nos valor calculados do módulo de elasticidade foi utilizada a equação (4) presente na NBR 7190 (ABNT, 1997).

3.7 ENSAIOS

Os ensaios realizados foram do tipo não destrutivos e realizados com os corpos de prova e estado natural e saturados. A saturação foi caracterizada pela imersão dos corpos de prova durante sete dias.

3.7.1 Ensaio de Flexão Simples Reta

Para a realização do ensaio de flexão simples reta, o corpo de prova foi fixado com auxílio de grampos tipo C, a fim de se aproximar de um engastamento, para então estabelecer as condições de contorno necessárias para a análise dos dados.

Com o corpo de prova já posicionado um transdutor de deslocamento mecânico é posicionado na parte superior da madeira com auxílio do eletroímã, na região de maiores deformações específicas, centralizado em relação à largura da peça a ser ensaiada.

Primeiramente é feita a leitura inicial do transdutor de deslocamento para então adicionar as carga de 1 kg. A cada acréscimo de carga, foi coletada o deslocamento apontada pelo transdutor de deslocamento e o valor da carga aplicada.



Imagem 5 – Ensaio de flexão simples reta.
Fonte: autoria própria.

De posse de todos os dados coletados, o módulo de elasticidade foi obtido por meio da equação da linha elástica, conforme equação (13).

$$y = \frac{PL^3}{3EI} \quad (13)$$

Onde:

y - deslocamento vertical;

P - Carga aplicada;

L - comprimento do corpo de prova;

E - módulo de elasticidade.

FLUXOGRAMA – ENSAIO DE FLEXÃO SIMPLES RETA

Equipamentos Necessários:

- Grampos C (Sargento)
- Transdutor de deslocamento
- Peso Calibrado
- Suporte com eletroímã

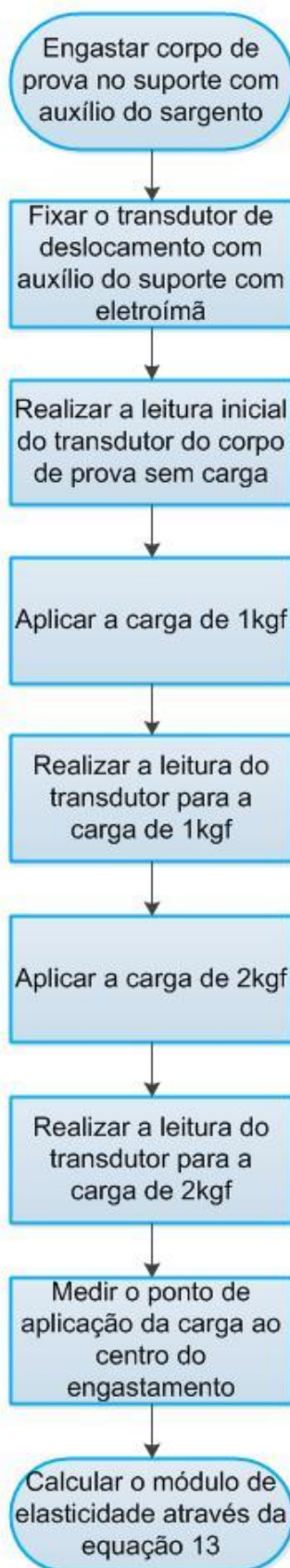


Figura 10 – Fluxograma de ensaio de flexão simples reta.
Fonte: Autoria própria.

3.7.2 Ensaio de Ultrassom

Para realização dos ensaios de ultrassom os transdutores eletroacústicos são conectados a unidade de recepção e geração de sinais ultrassônicos e as superfícies do corpo-de-prova são revestidas com uma camada de gel, proporcionando o contato com os transdutores eletroacústicos. Garantindo dessa maneira a emissão e recepção dos pulsos através do corpo-de-prova.



Imagem 6 – Ensaio de Ultrassom.
Fonte: autoria própria.

A leitura realizada no equipamento é de velocidade de propagação da onda, a qual será utilizada na aplicação da equação (10). Foi utilizada a massa específica natural para o cálculo do módulo de elasticidade para os corpos de prova em estado natural e a massa específica saturada para o cálculo do módulo de elasticidade para os corpos de prova saturados.

Lembrando que devido à precisão do equipamento a leitura inicial de velocidade foi realizada para um corpo de prova de 1 metro de comprimento, sendo assim necessário o tratamento dos dados coletados para a adequação dos valores.

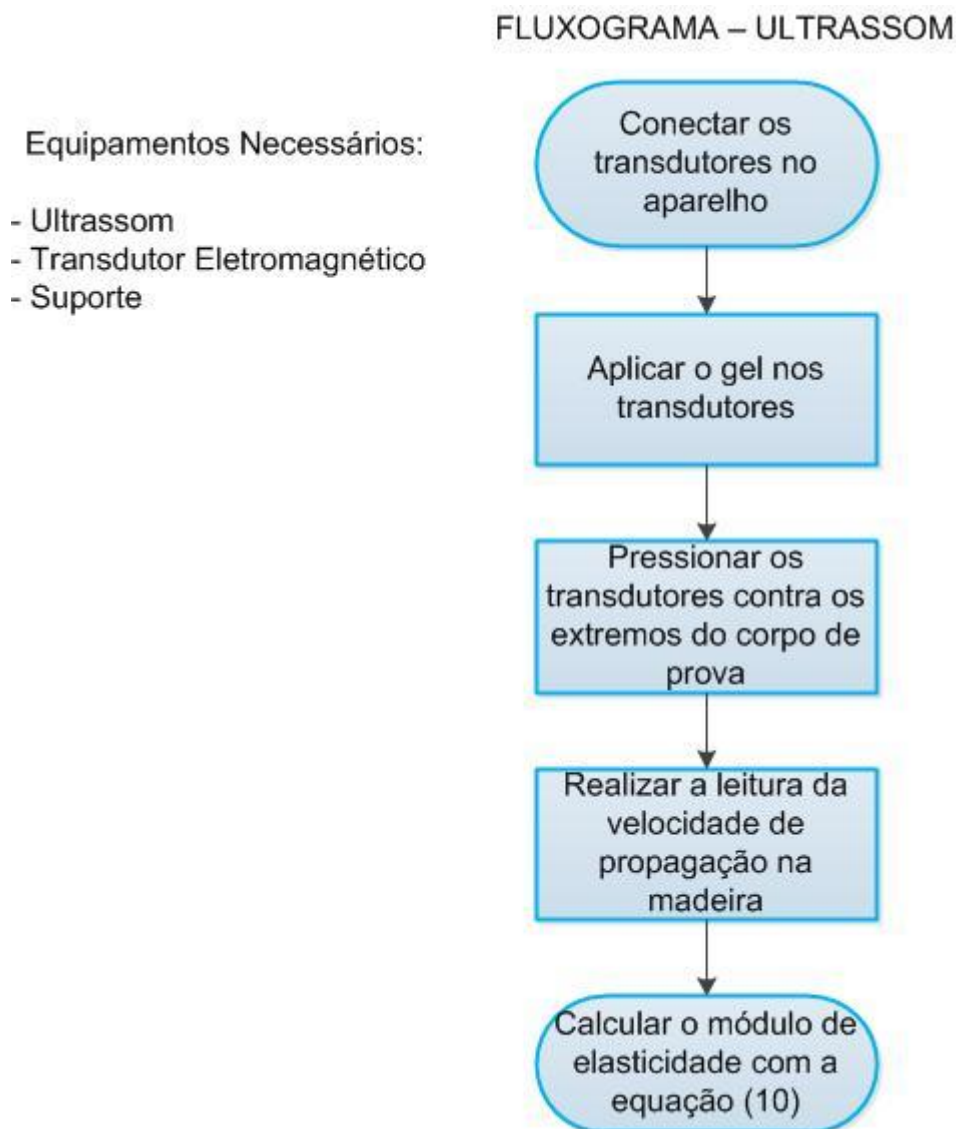


Figura 11 – Fluxograma de ensaio de ultrassom.
 Fonte: Autoria própria.

3.8 RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA E MÓDULO DE ELASTICIDADE

Para a estimativa da resistência das madeiras ensaiadas, foi utilizado uma relação entre o valor de f_{c0k} e módulo de elasticidade obtido através da NBR 7190 (ABNT, 1997). Encontrou-se esse valor dividindo o módulo de elasticidade normalizado pela resistência normalizada.

De posse dos valores calculados de módulo de elasticidade para as madeiras estudadas nos estados natural e saturada, o coeficiente encontrado na relação obtida com os valores normalizados foi aplicado nos resultados, para assim estimar a resistência das madeiras.

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos nos testes realizados estão resumidos na tabela 1, e detalhados no apêndice.

Tabela 1 – Resultados.
Fonte: Autoria própria.

		VALORES DE E_{c0m} (MPa)			Kmod2		1/Kmod2	Fc0k (MPa)		
		REFERÊNCIA	FSR	UTS	FSR	UTS	UTS	NBR	FSR	UTS
U = 12%	PINUS	6.463	6.544	7.824	-	-	-	25	19,2	22,7
	ARAUCÁRIA	10.719	11.535	8.966	-	-	-	25	24,3	26,4
	CEDRO	8.058	7.986	11.093	-	-	-	20	16,8	23,4
	PEROBA	9.280	9.007	19.067	-	-	-	60	22,1	46,7
SATURADO	PINUS	4.201	3.232	8.978	0,49	1,16	0,86	-	-	-
	ARAUCÁRIA	6.967	7.962	10.148	0,69	1,13	0,88	-	-	-
	CEDRO	5.238	6.284	17.608	0,79	1,59	0,63	-	-	-
	PEROBA	6.032	6.401	18.976	0,71	1,00	-	-	-	-
				MÉDIA	0,67	1,22	0,79			

FSR é ensaio de flexão simples reta.

UTS é ensaio de ultrassom.

A tabela a seguir mostra o valor de relação entre o módulo de elasticidade calculado e o valor de referência.

Tabela 2 – Relação do módulo de elasticidade calculado com o referência.
Fonte: Autoria própria.

Módulo de Elasticidade	Madeiras			
	Araucária	Cedro	Peroba	Pinus
Relação $E_{fsr,nat} / E_{ref,nat}$	1,08	0,99	0,97	1,01
Relação $E_{u,nat} / E_{ref,nat}$	0,84	1,38	2,05	1,20
Relação $E_{fsr,sat} / E_{ref,sat}$	1,04	1,01	1,02	0,74
Relação $E_{u,sat} / E_{ref,sat}$	1,33	2,90	2,93	1,93

5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A metodologia aplicada para o ensaio de flexão simples reta proporcionou uma fácil obtenção de dados, bem como sua análise e utilização dos equipamentos. Os resultados para as espécies pinus, araucária e cedro obtidos por meio deste ensaio tiveram sua relação de módulo de elasticidade calculado com o módulo de elasticidade de referência muito próxima a 1, o que torna os valores confiáveis para estas espécies. Uma possível justificativa para os valores encontrados para a peroba é a idade da madeira ensaiada, que tem aproximadamente 50 anos de idade, e o fato de ser fruto de madeira de demolição de casas antigas.

Os resultados para a relação do módulo de elasticidade calculado com o módulo de elasticidade de referência para o ultrassom não ficaram próximos a 1. O que demonstra possíveis falhas e sugere estudos posteriores sobre a aplicação dessa metodologia para o estudo da propriedade da madeira estudada neste trabalho.

O valor médio calculado para k_{mod2} de 0,67 para o ensaio de flexão simples reta conferiu o valor indicado pela NBR 7190 (ABNT, 1997) de 0,65.

O valor de k_{mod2} de 1,22 calculado para o ensaio de ultrassom não é conclusivo. O valor do módulo de elasticidade da madeira saturada sofreu um aumento excessivo, atribui-se isso ao fato de que a madeira saturada possui densidade maior, e assim a propagação das ondas também sofre acréscimo, pois a velocidade de propagação em material mais denso é maior, assim como acontece com a onda de som na água. Criou-se então uma relação do inverso de k_{mod2} e os resultados demonstraram convergência, com ressalvas.

Para estimar o valor de f_{c0k} foi criada uma relação entre módulo de elasticidade e resistência normalizados e empregados nos valores de módulo de elasticidade calculados. Os resultados estimados de f_{c0k} se demonstraram próximos aos valores de referência para o pinus, araucária e cedro. Os valores de resistência estimados para a peroba estão abaixo do valor de resistência de referência.

6 CONCLUSÕES

As principais conclusões deste trabalho são:

- Conseguiu-se realizar ensaios de flexão simples reta para a obtenção do módulo de elasticidade da madeira com a utilização de equipamentos de fácil obtenção e montagem.
- A velocidade de propagação de ondas na madeira se demonstrou maior em material mais denso, no caso dos corpos de prova saturados, como esperado pela literatura. O módulo de elasticidade aumentou conforme aumentou-se a densidade.
- Os valores calculados para o módulo de elasticidade foram comparados com os valores de referência, encontrando-se uma relação onde quanto mais próximo a 1, mais perto do valor de referência estava o valor calculado.
- Criou-se uma relação entre o valor de resistência e o módulo de elasticidade a partir de valores normatizados para estimar os valores das resistências a partir dos resultados do valor do módulo de elasticidade.
- Confirmou-se o valor do coeficiente k_{mod2} para o caso de flexão simples reta, onde o valor médio calculado foi de 0,67, com o valor normatizado de 0,65.

Finalmente, conclui-se que a obtenção do módulo de elasticidade por ensaios de flexão simples reta é válida para caracterização da madeira em estado natural e saturado. Os resultados encontrados para a relação entre o valor calculado e valor de referência foram próximos a 1 o que demonstra confiabilidade nos resultados. O ensaio de ultrassom não demonstrou resultados conclusivos para as madeiras ensaiadas com a metodologia empregada.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar os ensaios e procedimentos utilizados neste trabalho para diferentes espécies de madeira.
- Verificar a confiabilidade da obtenção do valor do f_{c0k} por meio da relação criada com o módulo de elasticidade e resistência conforme NBR 7190 (ABNT, 1997).
- Verificar a confiabilidade da utilização dos ensaios de ultrassom para a caracterização do valor de k_{mod2} . Encontrar uma relação que possibilite o estudo do coeficiente com os valores calculados através do ensaio.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**. Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 1997.

BEER, Ferdinand P. & JOHNSTON JR. E. Russel. **Resistência dos Materiais**. 3ª Ed. São Paulo: Makron, 1995.

BERTOLINI, Marília da Silva; SILVA, Diego A. L.; SOUZA, Amós Magalhães de; NETO Carlito Calil, LAHR, Francisco A. Rocco. Influência do comprimento de corpos-de-prova na obtenção do modulo de Elasticidade E_{c0} . **Floresta e Ambiente**. Seropédica, v. 19, n. 2, p. 179-183 abr/jun 2010.

CALIL JUNIOR, Carlito; LAHR, Francisco Antonio Rocco; DIAS, Antonio Alves. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira** – Barueri, SP: Manole, 2003.

CANDIAN, Marcela; SALES, Almir. Aplicação das técnicas não-destrutivas de ultrassom, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 83-98, out/dez 2009.

CARVALHO, Paulo Ernani Ramalho de. Peroba-Rosa - Aspidospermopolynuron. **Circular técnica**, Colombo, v. 96, Dez. 2004.

LA MADERA. Barcelona: Blume, 1980, il. Tradução de: The international book of wood. ISBN 84-7031-090-9.

LOGSDON, Norman Barros. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira**. 1998. 174p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

ZENID, Geraldo José. **Madeira: uso sustentável na construção civil** 2. ed. -- São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: SVMA, 2009. -- (Publicação IPT; 2010)

MELO, Julio Eustaquia de. **Influência das dimensões dos corpos-de-prova e da velocidade de ensaio na caracterização de três espécies de madeiras tropicais**. 2010. 134p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

MONTE, Renata; ALMEIDA, Valeria; KUDO, Elisabete K.; BARROS, Mercia S. B.; JOHN, Vanderley M. Módulo de elasticidade dinâmico: comparação entre velocidade da onda ultrassônica e frequência ressonante. **SBTA - Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, ago/2011.

PENNER, Elisabeth. **Avaliação da Rigidez dos Pilares de Concreto Armado para a Verificação da Estabilidade de Pórticos**. Dissertação de Mestrado, EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle Schubert; **Estruturas de madeira** – Rio de Janeiro, RJ: LTC – Livros técnicos e científicos editora, 2003.

APÊNDICE

TABELA 1 - ENSAIO DE FLEXÃO SIMPLES RETA - NATURAL

Madeira: Peroba

CP	P1 = 1,00 kg			P2 = 2,00 kg			L mm	E1 MPa	E2 MPa	Em MPa	Eiter MPa	Relação (Em/Eliter)
	Y _{reposo1}	Y _{final1}	ΔY1	Y _{reposo2}	Y _{final2}	ΔY2						
	mm	mm	mm	mm	mm	mm						
PB1	7,44	4,11	3,33	7,44	0,49	6,95	280	8,741	8,390	8,566	9,280	0,97
PB2	8,08	5,50	2,58	8,08	2,74	5,34	280	9,821	9,505	9,663	9,280	
PB3	6,75	3,70	3,05	6,75	0,44	6,31	280	9,318	9,023	9,170	9,280	
PB4	8,86	6,44	2,42	8,86	3,72	5,14	280	9,444	8,908	9,176	9,280	
PB5	8,52	5,27	3,25	8,52	1,81	6,71	280	8,126	7,885	8,006	9,280	
PB6	8,35	5,58	2,77	8,35	2,55	5,80	280	9,670	9,252	9,461	9,280	
Média Geral										9,007	9,280	

TABELA 2 - ENSAIO DE FLEXÃO SIMPLES RETA - NATURAL

Madeira: Cedro

CP	P1 = 1,00 kg			P2 = 2,00 kg			L mm	E1 MPa	E2 MPa	Em MPa	Eiter MPa	Relação (Em/Eliter)
	Y _{reposo1}	Y _{final1}	ΔY1	Y _{reposo2}	Y _{final2}	ΔY2						
	mm	mm	mm	mm	mm	mm						
CD1	8,36	6,16	2,20	8,1	3,49	4,61	280	8,206	7,845	8,025	8,058	0,99
CD2	9,71	7,5	2,21	9,71	4,82	4,89	280	8,059	7,296	7,677	8,058	
CD3	8,76	6,5	2,26	8,76	3,96	4,80	280	7,823	7,379	7,601	8,058	
CD4	8,81	6,75	2,06	8,81	4,45	4,36	280	8,879	8,404	8,641	8,058	
Média Geral										7,986	8,058	

TABELA 3 - ENSAIO DE FLEXÃO SIMPLES RETA - NATURAL

Madeira: Pinus

CP	P1 = 1,00 kg			P2 = 2,00 kg			L mm	E1 MPa	E2 MPa	Em MPa	Eiter MPa	Relação (Em/Eliter)
	Y _{reposo1}	Y _{final1}	ΔY1	Y _{reposo2}	Y _{final2}	ΔY2						
	mm	mm	mm	mm	mm	mm						
PN1	9,48	6,80	2,68	9,20	4,15	5,05	272,5	6,458	6,866	6,662	6,463	1,01
PN2	9,30	5,75	3,55	9,44	4,10	5,34	280	5,722	7,621	6,671	6,463	
PN3	8,44	4,43	4,01	8,84	4,27	4,57	280	4,590	8,068	6,329	6,463	
PN4	8,44	4,56	3,88	8,55	3,44	5,11	272,5	5,167	7,859	6,513	6,463	
Média Geral										6,544	6,463	

TABELA 4 - ENSAIO DE FLEXÃO SIMPLES RETA - NATURAL

Madeira: Araucaria

CP	P1 = 1,00 kg			P2 = 2,00 kg			L mm	E1 MPa	E2 MPa	Em MPa	Eiter MPa	Relação (Em/Eliter)
	Y _{reposo1}	Y _{final1}	ΔY1	Y _{reposo2}	Y _{final2}	ΔY2						
	mm	mm	mm	mm	mm	mm						
AR1	6,68	4,76	1,92	4,76	1,01	3,75	280	11,276	11,566	11,421	10,719	1,08
AR2	8,94	7,10	1,84	7,10	3,14	3,96	280	11,571	10,771	11,171	10,719	
AR3	7,55	5,52	2,03	5,52	1,45	4,07	280	11,968	11,959	11,963	10,719	
AR4	9,15	7,18	1,97	7,18	3,28	3,90	280	11,516	11,654	11,585	10,719	
Média Geral										11,535	10,719	

Variáveis:

- Y_{reposo1} - leitura inicial do extensômetro, ensaio com P1.
- Y_{final1} - leitura final do extensômetro, ensaio com P1.
- ΔY1 - deslocamento vertical, ensaio com P1.
- Y_{reposo2} - leitura inicial do extensômetro, ensaio com P2.
- Y_{final2} - leitura final do extensômetro, ensaio com P2.
- ΔY2 - deslocamento vertical, ensaio com P2.
- L - comprimento de engaste adotado para ensaio.
- E1 - módulo de elasticidade calculado do ensaio com P1.
- E2 - módulo de elasticidade calculado do ensaio com P2.
- Em - módulo de elasticidade médio calculado.
- Eiter - módulo de elasticidade retirado da literatura.
- g - aceleração da gravidade (m/s²).

TABELA 5 - ENSAIO DE FLEXÃO SIMPLES RETA - SATURADO

Madeira: Peroba

CP	P1 = 1,00 kg			P2 = 2,00 kg			L mm	E ₁ MPa	E ₂ MPa	E _m MPa	E _{liter} MPa	Relação (E _m /E _{liter})
	Y _{reposou} mm	Y _{final} mm	ΔY mm	Y _{reposou} mm	Y _{final} mm	ΔY mm						
	P1 = 9,80 N			P2 = 19,64 N								
PB1	9,78	4,67	5,11	14,55	3,65	10,90	280	5,696	5,350	5,523	6,032	1,06
PB2	8,78	5,72	3,06	8,78	2,22	6,56	280	8,280	7,738	8,009	6,032	
PB3	9,98	6,60	3,38	9,98	2,80	7,18	280	8,408	7,930	8,169	6,032	
PB4	9,67	5,89	3,78	9,67	1,96	7,71	280	6,046	5,938	5,992	6,032	
PB5	9,47	4,78	4,69	15,29	1,32	13,97	280	5,631	3,787	4,709	6,032	
PB6	11,88	7,50	4,38	11,88	2,77	9,11	280	6,115	5,890	6,003	6,032	
Média Geral										6,401	6,032	1,06

TABELA 6 - ENSAIO DE FLEXÃO SIMPLES RETA - SATURADO

Madeira: Cedro

CP	P1 = 1,00 kg			P2 = 2,00 kg			L mm	E ₁ MPa	E ₂ MPa	E _m MPa	E _{liter} MPa	Relação (E _m /E _{liter})
	Y _{reposou} mm	Y _{final} mm	ΔY mm	Y _{reposou} mm	Y _{final} mm	ΔY mm						
	P1 = 9,80 N			P2 = 19,64 N								
CD1	12,59	9,98	2,61	12,59	6,40	6,19	285	7,294	6,161	6,727	5,238	1,20
CD2	12,62	9,91	2,71	12,62	5,87	6,75	285	6,930	5,574	6,252	5,238	
CD3	11,47	8,89	2,58	11,47	4,77	6,70	285	7,227	5,575	6,401	5,238	
CD4	11,6	8,5	3,10	11,6	4,30	7,30	285	6,222	5,293	5,757	5,238	
Média Geral										6,284	5,238	1,20

TABELA 7 - ENSAIO DE FLEXÃO SIMPLES RETA - SATURADO

Madeira: Pinus

CP	P1 = 1,00 kg			P2 = 2,00 kg			L mm	E ₁ MPa	E ₂ MPa	E _m MPa	E _{liter} MPa	Relação (E _m /E _{liter})
	Y _{reposou} mm	Y _{final} mm	ΔY mm	Y _{reposou} mm	Y _{final} mm	ΔY mm						
	P1 = 9,80 N			P2 = 19,64 N								
PN1	11,70	4,52	7,18	17,19	0,88	16,31	285	2,758	2,432	2,595	4,201	0,77
PN2	11,60	6,26	5,34	11,60	0,13	11,47	285	4,011	3,741	3,876	4,201	
PN3	11,59	5,66	5,93	17,15	3,90	13,25	285	3,273	2,934	3,104	4,201	
PN4	11,45	4,94	6,51	17,25	2,80	14,45	285	3,523	3,179	3,351	4,201	
Média Geral										3,232	4,201	0,77

TABELA 8 - ENSAIO DE FLEXÃO SIMPLES RETA - SATURADO

Madeira: Araucaria

CP	P1 = 1,00 kg			P2 = 2,00 kg			L mm	E ₁ MPa	E ₂ MPa	E _m MPa	E _{liter} MPa	Relação (E _m /E _{liter})
	Y _{reposou} mm	Y _{final} mm	ΔY mm	Y _{reposou} mm	Y _{final} mm	ΔY mm						
	P1 = 9,80 N			P2 = 19,64 N								
AR1	11,86	8,86	3,00	11,86	6,50	5,36	285	7,610	8,533	8,072	6,967	1,14
AR2	11,75	8,67	3,08	11,75	6,07	5,68	285	7,290	7,919	7,604	6,967	
AR3	10,88	7,71	3,17	10,88	5,15	5,73	285	8,082	8,957	8,520	6,967	
AR4	10,29	7,10	3,19	10,29	4,15	6,14	285	7,500	7,806	7,653	6,967	
Média Geral										7,962	6,967	1,14

Variáveis:

Y_{reposou1} - leitura inicial do extensômetro, ensaio com P1.Y_{final1} - leitura final do extensômetro, ensaio com P1.ΔY₁ - deslocamento vertical, ensaio com P1.Y_{reposou2} - leitura inicial do extensômetro, ensaio com P2.Y_{final2} - leitura final do extensômetro, ensaio com P2.ΔY₂ - deslocamento vertical, ensaio com P2.

L - comprimento de engaste adotado para ensaio.

E₁ - módulo de elasticidade calculado do ensaio com P1.E₂ - módulo de elasticidade calculado do ensaio com P2.E_m - módulo de elasticidade médio calculado.E_{liter} - módulo de elasticidade retirado da literatura.g - aceleração da gravidade (m/s²).

TABELA 9 - ENSAIO DE ULTRASSOM - NATURAL

Madeira: Peroba

CP	V m/s	ρ_{nat} kg/m ³	Ec MPa	Eliter MPa	Relação (Em/Eliter)
PB7	16.501	837	20.466	9.280	
PB8	15.360	835	17.642	9.280	
PB9	15.360	910	19.092	9.280	
Média Geral			19.067	9.280	2,05

TABELA 10 - ENSAIO DE ULTRASSOM - NATURAL

Madeira: Cedro

CP	V m/s	ρ_{nat} kg/m ³	Ec MPa	Eliter MPa	Relação (Em/Eliter)
CD5	16.694	454	11.383	8.058	
CD6	17.605	390	10.803	8.058	
Média Geral			11.093	8.058	1,38

TABELA 11 - ENSAIO DE ULTRASSOM - NATURAL

Madeira: Pinus

CP	V m/s	ρ_{nat} kg/m ³	Ec MPa	Eliter MPa	Relação (Em/Eliter)
PN5	13.106	473	7.286	6.463	
PN6	13.642	488	8.163	6.463	
Média Geral			7.724	6.463	1,20

TABELA 12 - ENSAIO DE ULTRASSOM - NATURAL

Madeira: Araucária

CP	V m/s	ρ_{nat} kg/m ³	Ec MPa	Eliter MPa	Relação (Em/Eliter)
AR5	15.748	385	8.581	10.719	
AR6	15.011	463	9.352	10.719	
Média Geral			8.966	10.719	0,84

Variáveis:

V - velocidade registrada pelo ultrassom.

 ρ_{nat} - massa específica natural.

Ec - módulo de elasticidade calculado.

Eliter - módulo de elasticidade retirado da literatura.

TABELA 13 - ENSAIO DE ULTRASSOM - SATURADO

Madeira: Peroba

CP	V m/s	ρ_{nat} kg/m ³	Ec MPa	Eliter MPa	Relação (Em/Eliter)
PB7	15.698	938	20.747	6.032	
PB8	14.224	946	17.136	6.032	
PB9	14.224	1.058	19.043	6.032	
Média Geral			18.976	6.032	3,15

TABELA 14 - ENSAIO DE ULTRASSOM - SATURADO

Madeira: Cedro

CP	V m/s	ρ_{nat} kg/m ³	Ec MPa	Eliter MPa	Relação (Em/Eliter)
CD5	15.573	817	17.824	5.238	
CD6	15.384	823	17.393	5.238	
Média Geral			17.608	5.238	3,36

TABELA 15 - ENSAIO DE ULTRASSOM - SATURADO

Madeira: Pinus

CP	V m/s	ρ_{nat} kg/m ³	Ec MPa	Eliter MPa	Relação (Em/Eliter)
PN5	9.587	1.006	8.302	4.201	
PN6	10.416	990	9.653	6.463	
Média Geral			8.978	5.332	1,68

TABELA 16 - ENSAIO DE ULTRASSOM - SATURADO

Madeira: Araucária

CP	V m/s	ρ_{nat} kg/m ³	Ec MPa	Eliter MPa	Relação (Em/Eliter)
AR5	13.661	631	10.584	6.967	
AR6	13.301	612	9.712	6.967	
Média Geral			10.148	6.967	1,46

Variáveis:

V - velocidade registrada pelo ultrassom.

 ρ_{nat} - massa específica natural.

Ec - módulo de elasticidade calculado.

Eliter - módulo de elasticidade retirado da literatura.

TABELA 17 - PROPRIEDADES DOS CORPOS DE PROVA

CP	b1	b2	b3	bmed	h1	h2	h3	hmed	L	Área _{med}	Vol _{med}	I _m	Mass _{nat}	P _{nat}	Mass _{sat}	P _{sat}	Mass _{seco}	P _{seco}	Unidade
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	mm ³	mm ⁴	g	kg/m ³	g	kg/m ³	g	kg/m ³	%
PEROBA																			
PB1	30,20	30,60	31,10	31,10	10,10	9,80	9,60	9,83	299,10	305,23	91,469,77	2,464,23	84,65	925,44	108,92	1,190,78	77,18	843,78	10%
PB2	31,50	31,80	31,80	31,70	10,10	10,50	10,10	10,23	300,25	324,40	97,400,10	2,830,93	87,75	900,92	113,22	1,162,42	79,86	819,92	10%
PB3	31,10	30,80	30,80	30,90	9,60	10,20	10,00	9,93	300,25	306,94	92,158,74	2,523,84	87,50	949,45	113,12	1,227,45	79,74	865,25	10%
PB4	32,70	32,20	32,70	32,53	10,20	10,50	10,80	10,50	300,00	341,60	102,480,00	3,138,45	83,79	817,62	111,92	1,092,12	76,73	748,73	9%
PB5	32,50	32,30	32,00	32,27	9,80	10,10	10,20	10,03	297,50	323,74	96,313,31	2,715,87	84,14	873,61	108,63	1,127,88	76,79	797,29	10%
PB6	31,60	31,30	31,60	31,50	10,20	9,80	10,20	10,07	293,00	317,10	92,910,30	2,677,85	88,87	956,51	112,59	1,211,81	80,72	868,79	10%
PB7	50,80	50,60	50,60	50,67	50,80	48,80	48,60	49,40	299,60	2,502,93	749,878,83	509,004,87	627,95	837,40	703,37	937,98	567,80	757,19	11%
PB8	50,60	50,60	50,20	50,47	49,20	49,50	48,80	49,17	299,20	2,481,28	742,398,31	499,845,37	620,13	835,31	702,41	946,14	566,70	763,34	9%
PB9	49,90	50,10	50,40	50,13	49,30	49,20	48,70	49,07	298,20	2,459,88	733,534,89	493,520,28	667,55	910,05	776,43	1,058,48	607,90	828,73	10%
CD1	29,30	29,20	29,30	29,27	11,70	12,10	11,50	11,77	299,15	344,37	103,018,62	3,973,31	49,95	484,86	66,63	646,78	44,58	432,74	12%
CD2	29,20	29,10	29,20	29,17	11,80	11,70	12,00	11,83	298,80	345,14	103,127,50	4,027,42	52,54	509,47	70,22	680,90	46,65	452,35	13%
CD3	29,20	29,20	29,00	29,13	11,90	12,00	11,70	11,87	299,70	345,72	103,610,95	4,056,91	49,59	478,62	72,08	695,68	44,17	426,31	12%
CD4	29,20	29,00	29,20	29,13	11,70	11,80	11,70	11,73	299,20	341,83	102,275,87	3,921,69	50,94	498,06	66,57	650,89	45,52	445,07	12%
CD5	51,70	51,70	52,00	51,80	51,10	51,40	51,20	51,23	299,90	2,653,89	795,900,61	580,505,52	361,46	454,15	650,39	817,17	321,00	403,32	13%
CD6	51,10	51,40	51,10	51,20	51,40	51,50	51,60	51,50	298,90	2,636,80	788,139,52	582,787,73	307,48	390,13	648,30	822,57	274,20	347,91	12%
PN1	29,20	29,40	29,50	29,37	11,60	11,50	11,70	11,60	300,10	340,65	102,230,07	3,819,86	48,75	476,87	111,60	1,091,66	43,95	429,91	11%
PN2	29,40	29,50	29,20	29,37	11,70	11,70	10,50	11,30	300,20	331,84	99,619,37	3,531,09	51,41	516,06	111,78	1,122,07	46,30	464,77	11%
PN3	29,20	29,30	29,10	29,20	11,70	11,80	11,60	11,70	299,50	341,64	102,321,18	3,897,26	51,46	502,93	113,05	1,104,85	46,14	450,93	12%
PN4	29,60	29,50	29,30	29,47	11,10	11,10	10,90	11,03	299,45	325,12	97,355,85	3,298,15	55,88	573,98	105,63	1,084,99	50,99	523,75	10%
PN5	50,90	50,80	50,70	50,80	51,60	51,60	51,40	51,53	299,60	2,617,89	784,320,84	579,358,22	370,65	472,57	789,29	1,006,34	331,00	422,02	12%
PN6	50,70	50,80	50,70	50,73	51,00	51,30	51,30	51,20	299,80	2,597,55	778,744,49	567,442,73	380,03	488,00	770,89	989,91	337,90	433,90	12%
AR1	29,00	29,80	29,20	29,33	11,10	11,00	11,10	11,07	300,10	324,62	97,419,13	3,313,07	53,94	553,69	73,10	750,37	49,01	503,08	10%
AR2	29,10	29,00	29,00	29,03	11,20	11,00	11,00	11,17	298,70	324,21	96,840,20	3,368,89	53,74	554,93	74,65	770,86	48,58	501,65	11%
AR3	29,50	29,80	29,10	29,47	11,10	10,10	10,70	10,63	299,40	313,33	93,810,67	2,952,28	51,96	553,88	73,48	783,28	47,13	502,39	10%
AR4	29,60	29,70	29,40	29,57	10,80	10,80	11,00	10,87	299,80	321,29	96,323,08	3,161,62	54,72	568,09	84,34	875,59	49,84	517,43	10%
AR5	50,10	50,80	50,40	50,43	51,70	52,20	51,70	51,87	299,70	2,615,81	783,957,92	586,410,10	302,00	385,22	495,00	631,41	272,90	348,11	11%
AR6	50,50	50,60	50,40	50,50	51,40	51,50	51,30	51,40	299,50	2,595,70	777,412,15	571,477,96	359,69	462,68	475,76	611,98	324,10	416,90	11%

b1 - largura do corpo de prova.

b2 - largura do corpo de prova.

b3 - largura do corpo de prova.

bmed - largura média do corpo de prova.

h1 - altura do corpo de prova.

h2 - altura do corpo de prova.

h3 - altura do corpo de prova.

hmed - altura média do corpo de prova.

L - comprimento do corpo de prova.

Área_{med} - área de seção transversal do corpo de prova.Vol_{med} - volume do corpo de prova.I_m - momento de inércia do corpo de prova.Mass_{nat} - massa natural do corpo de prova.P_{nat} - massa específica natural do corpo de prova.Mass_{sat} - massa saturada do corpo de prova.P_{sat} - massa específica saturada do corpo de prova.Mass_{seco} - massa seca do corpo de prova.P_{seco} - massa específica seca do corpo de prova.

Unidade - unidade do corpo de prova.