



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus Experimental de Itapeva

LUCAS GOMES DA SILVA

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ELASTICIDADE
PARA MADEIRA DE PINUS E EUCALIPTO SEGUNDO A ABNT NBR
7190:1997.**

Itapeva - SP
2015

LUCAS GOMES DA SILVA

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECANICAS DE ELASTICIDADE
PARA MADEIRA DE PINUS E EUCALIPTO SEGUNDO A ABNT NBR
7190:1997.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus Experimental de Itapeva, como requisito para a conclusão do curso de Engenharia Industrial Madeireira.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina

Itapeva - SP
2015

S586e Silva, Lucas Gomes da
Estudo das propriedades mecânicas de elasticidade para madeira de pinus e eucalipto segundo a ABNT NBR 7190:1997 / Lucas Gomes da Silva. -- Itapeva, SP, 2015

67 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado – Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Experimental de Itapeva, 2015

Orientador: Júlio Cesar Molina

Banca examinadora: Marília da Silva Bertolini, Rafael dos Santos

Bibliografia

1. Madeira - Propriedades mecânicas. 2. Elasticidade. 3. Normas técnicas I. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”. Campus Experimental de Itapeva. II Título

CDD 620.12

LUCAS GOMES DA SILVA

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ELASTICIDADE
PARA MADEIRA DE PINUS E EUCALIPTO SEGUNDO A ABNT NBR
7190:1997.**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Industrial Madeireira, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: 
Prof. Dr. Júlio Cesar Molina
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

2º Examinador: 
Profª. Drª. Marília da Silva Bertolini
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

3º Examinador: 
Prof. Me. Rafael dos Santos
Universidade Estadual Paulista - UNESP – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

Itapeva, 10 de novembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado o privilégio de vivenciar todas as etapas percorridas durante estes 5 anos de graduação.

Agradeço também a toda minha família, em especial ao meu pai João e minha mãe Josélia que com toda sabedoria e paciência me orientaram da melhor maneira possível a ser um cidadão de bem, honesto e de respeito, serei eternamente grato por isso.

Aos meus amigos que no decorrer deste tempo sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado.

Ao meu orientador Júlio que no decorrer do trabalho sempre soube auxiliar a ser objetivo e clarear as ideias.

Aos técnicos e funcionários do campus da UNESP Itapeva, que auxiliaram desde a parte dos ensaios laboratoriais até a parte escrita do trabalho de conclusão de curso.

RESUMO

Os projetos estruturais no Brasil são calculados com base nas propriedades mecânicas, obtidas a partir de ensaios experimentais padronizados pela ABNT NBR 7190:1997, os quais visam quantificar tais variáveis às devidas condições de solicitação mecânica. Nesse contexto a referida norma brasileira de madeiras propõe algumas relações de resistência e de rigidez que são obtidas em função diferentes propriedades, sejam elas elásticas ou de resistência relacionadas entre si por coeficientes. No entanto, a madeira por ser um material variável, em muitos casos, apresenta variações consideráveis dos coeficientes dessas referidas relações. O presente trabalho de pesquisa teve como finalidade analisar através de ensaios experimentais as relações propostas pela norma de madeiras ABNT NBR 7190:1997 que relacionam o módulo de elasticidade na compressão (E) e na flexão (E_M) através dos valores 0,90 para madeiras folhosas e de 0,85 para as coníferas. Também foi avaliada a relação entre o módulo de elasticidade transversal (G) e longitudinal (E) como sendo de 20 para ambos os gêneros de madeira. Os resultados mostraram que algumas relações analisadas apresentaram valores para os coeficientes com variações de até 80% com relação aos valores propostos pela norma brasileira.

Palavras chave: resistência, rigidez, ABNT NBR 7190:1997, relações

ABSTRACT

The structural projects in Brazil are calculated based on the mechanical properties obtained from experimental tests standardized by ABNT NBR 7190: 1997, which aim to quantify these variables due to mechanical requests. In this context the Brazilian standard recommends some strength and stiffness relations that are obtained depending on different properties by coefficients. However, the timber is a variable material, and in many cases, it is observed considerably variety for the coefficients of these relationships. The aim of this work was to analyze through experimental tests the relations proposed by NBR 7190: 1997 relating the modulus of elasticity in compression (E) and bending (E_M) through the values 0.90 for woods hardwood and 0.85 for softwoods. It were also evaluated the relationships between the shear modulus (G) and longitudinal (L) to be 20 for both wood genres. The results showed that the relationships analyzed showed values for the coefficients with variations of up to 80% compared to the amounts proposed by the Brazilian standard.

Keywords: strength, stiffness, ABNT NBR 7190:1997, relationship.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de extração de corpos-de-prova.	13
Figura 2 - Corpo de Prova de Umidade.....	20
Figura 3 - Gráfico de Kollmann.....	23
Figura 4 - Corpo-de-prova de compressão paralela às fibras.	24
Figura 5 - Diagrama de carregamento para análise da rigidez da madeira à compressão paralela as fibras.....	25
Figura 6 - Corpo-de-prova de flexão	28
Figura 7 - Carga x flecha na flexão	29
Figura 8 - Cutelo acoplado ao atuador	30
Figura 9 - Diagrama de carregamento para análise da rigidez da madeira à flexão .	31
Figura 10 - Corpos-de-prova confeccionados e ensaiados	33
Figura 11 - Ensaio de compressão e flexão estática.	34
Figura 12 - Gráfico comparativo do ensaio de flexão (Eucalipto saligna) na EMIC...	37
Figura 13 - Diagrama Tensão x Deformação Especifica compressão paralela (Eucalipto saligna).....	40
Figura 14 – Diagrama Tensão x Deformação Espec. para flexão (Eucalipto grandis)	43
Figura 15 – Diagrama Tensão x Deformação Especific. para Compressão Paralela às fibras (Eucalipto Grandis).....	46
Figura 16 - Gráfico comparativo de flexão (Pinus elliottii)	48
Figura 17 - Diagrama Tensão x Deformação Especific. compressão paralela (Pinus elliottii)	51
Figura 18 - Diagrama Tensão x Deformação Específica para flexão estática (Eucalipto grandis).	53
Figura 19 - Diagrama Tensão x Deformação Especifica para flexão estática (Eucalipto saligna).....	56
Figura 20 - Diagrama Tensão x Deformação Especific. para Compressão Paralela às fibras (Pinus elliottii)	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados flexão EMIC e seus respectivos teores de umidade (Eucalipto saligna).....	38
Tabela 2 - Média do módulo de elasticidade de Flexão Estática a 12% de umidade (Eucalipto saligna).....	39
Tabela 3 - Resultados compressão EMIC com seus respectivos teores de umidade (Eucalipto saligna).....	41
Tabela 4 -Média do módulo de elasticidade de Compressão Paralela às fibras a12% de umidade (Eucalipto saligna)	42
Tabela 5 - Resultados flexão EMIC e seus respectivos teores de umidade (Eucalipto Grandis).....	44
Tabela 6 - Média do módulo de elasticidade de Flexão Estática a 12% de umidade (Eucalipto Grandis).....	45
Tabela 7 - Resultados Compressão Paralela às fibras EMIC (Eucalipto grandis)46	
Tabela 8 -Média do módulo de elasticidade de Flexão Estática a 12% de umidade(Eucalipto Grandis).....	47
Tabela 9 - Resultados flexão EMIC e seus respectivos teores de umidade (Pinus elliottii).....	49
Tabela 10 - Média do módulo de elasticidade de Flexão Estáticaa 12% de umidade (Pinus elliottii).....	50
Tabela 11 - Resultados compressão EMIC com seus respectivos teores de umidade (Pinus elliottii).....	51
Tabela 12 - Média do módulo de elasticidade de Compressão Paralela às fibras a12% de umidade (Pinus elliottii)	52
Tabela 13 - Resultados de flexão Estática EMIC e seus respectivos teores de umidade (Eucalipto grandis).....	54
Tabela 14 - Determinação do modulo de elasticidade transversal (G) (Eucalipto grandis).....	55
Tabela 15 - Resultados Flexão Estática EMIC e seus respectivos teores de umidade (Eucalipto saligna).....	57
Tabela 16 - Determinação do modulo de elasticidade transversal (G) (Eucalipto saligna).....	57

Tabela 17 - Resultados Flexão Estática EMIC e seus respectivos teores de umidade (Pinus elliottii).....	59
Tabela 18 - Determinação do modulo de elasticidade transversal (G) (Pinus elliottii)	60

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVOS.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA.....	13
3.1.1. Caracterização simplificada de madeira serrada	14
3.2. PROPRIEDADES DAS MADEIRAS.....	15
3.2.1. Resistência	15
3.2.2. Rigidez.....	15
3.2.2.1. Caracterização da rigidez da madeira	16
3.2.2.2. ESTIMATIVA DA RIGIDEZ	17
3.2.2.3. Correção dos valores de resistência e rigidez para umidade padrão.....	19
3.2.3. Teor de umidade.....	20
3.2.4. Densidade	21
3.2.4.1. Densidade básica.....	21
3.2.4.2. Densidade aparente	22
3.3. ENSAIOS.....	24
3.3.1. Compressão paralela às fibras	24
3.3.1.1. Procedimento.....	26
3.3.1.2. Caracterização completa da resistência da madeira à compressão paralela às fibras	27
3.3.2. Flexão	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1. MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	35
4.1.1. Flexão estática.....	35
4.1.2. Compressão paralela às fibras	35
4.2. ANÁLISE DO COEFICIENTE ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE TRANSVERSAL (G) E O MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL (E_M).....	36

5. RESULTADOS	37
5.1. FLEXÃO ESTÁTICA – EUCALIPTO SALIGNA	37
5.2. COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS – EUCALIPTO SALIGNA.....	39
5.2.1. Relação (E_M/E_{c0}) para Eucalipto saligna.....	42
5.3. FLEXÃO ESTÁTICA – EUCALIPTO GRANDIS.....	43
5.4. COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS – EUCALIPTO GRANDIS	45
5.4.1. Relação (E_M/E_{c0}) para Eucalipto grandis	47
5.5. FLEXÃO ESTÁTICA – PINUS ELLIOTTII	48
5.6. COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS – PINUS ELLIOTTII	50
5.6.1. Relação (E_M/E_{c0}) para Eucalipto saligna.....	52
5.7. ESTUDO DA RELAÇÃO 1/20 ENTRE E_{c0} E G.....	53
5.7.1. Relação (E_{c0}/G) para Eucalipto grandis.....	53
5.7.2. Eucalipto Saligna.....	56
Como realizado anteriormente para o Eucalipto Grandis, da mesma maneira foi para o Eucalipto Saligna, passando exatamente pelas duas etapas descritas, apresentando os resultados obtidos pela maquina universal de ensaios através da Figura 19 e da Tabela 15.	56
5.7.3. Pinus elliotti	58
6. CONCLUSÃO	62
7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	63
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1. INTRODUÇÃO

A análise das propriedades da madeira, sejam elas físicas ou mecânicas, ainda é de grande complexidade, devido ao fato da madeira ser um material natural e apresentar grande variabilidade de suas propriedades.

É de suma importância para os projetos estruturais o conhecimento de todas suas propriedades sejam elas físicas ou mecânicas, sendo que o embasamento dos cálculos e análises para a confecção destas estruturas é provido de ensaios experimentais normativos que dão uma maior segurança, quantificando tais dados com base na solicitação exigida (ZANGIÁCOMO, CHRSTÓFORO e LAHR, 2013).

A grande maioria das pesquisas no Brasil envolvem a caracterização de peças de madeira de dimensões estruturais através de ensaios realizados em corpos de prova padronizados por recomendações de documentos normativos internacionais, mas principalmente pela norma brasileira ABNT NBR 1790:1997, (Pigozzo et al., 2000; Fiorelli et al., 2009; Miotto e Dias, 2009; Carreira et al., 2010; Brito e Calil Jr., 2010; Christoforo et al., 2012).

A norma de madeiras ABNT NBR 7190:1997 foi proposta como base no método dos estados limites e atualmente a referida norma está em processo de revisão. Nesse sentido a versão de revisão, enviada para consulta nacional terá um corpo principal, e um documento específico, o “método de ensaios” como parte complementar do corpo principal da norma.

Algumas relações de resistência e de rigidez propostas pela norma de madeiras tem sido alvo de discussões relacionadas a sua validade, pois apresentam resultados com diferenças significativas dependendo da espécie de madeira utilizada no ensaio e na avaliação. Neste contexto a versão de revisão da norma tende a propor valores atualizados dessas relações visando melhorar os resultados para madeiras brasileiras.

Sendo assim, neste trabalho de pesquisa procurou-se analisar a validade das equações propostas pela norma ABNT NBR 7190:1997 para a avaliação da rigidez de madeiras de reflorestamento. Para a análise experimental, foram

realizados ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras, considerando diferentes espécies de madeira mais comumente utilizadas na região de Itapeva – SP, ou seja, *Eucalypto grandis*, *Eucalypto saligna* e *Pinus elliottii*.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho teve como finalidade analisar através de ensaios experimentais as relações propostas pela norma de madeiras ABNT NBR 7190:1997 que relacionam o módulo de elasticidade na compressão (E) e na flexão (E_M) através dos valores 0,90 para madeiras folhosas e 0,85 para coníferas.

Também foi avaliada a relação proposta pela referida norma entre o módulo de elasticidade transversal (G) e longitudinal (E) como sendo de 20.

Os objetivos específicos definidos foram:

- Obtenção experimental do valor do módulo de elasticidade longitudinal na compressão E_{c0} para madeiras de reflorestamento (Eucalipto e Pinus) através de ensaios de compressão realizados em corpos de prova ($U=12\%$) padronizados pela ABNT NBR 7190:1997;

- Obtenção experimental do valor do módulo de elasticidade longitudinal na flexão (E_M) para madeiras de reflorestamento (Eucalipto grandis, Eucalipto saligna e Pinus elliottii) através de ensaios de flexão com carga centrada no meio do vão realizados em corpos-de-prova (com relação entre o comprimento L e a altura $h > 21$) padronizados pela ABNT NBR 7190:1997;

- Comparação entre os módulos de elasticidade obtidos na compressão (E) e na flexão (E_{c0}) em madeiras de Eucalipto grandis, Eucalipto saligna e Pinus elliottii para a verificação da validade das equações propostas pela ABNT NBR 7190:2007 para comparação entre os referidos módulos;

- Obtenção através de ensaios experimentais do valor do módulo de elasticidade transversal (G) a partir de ensaios de flexão em corpos de prova propostos pela ABNT NBR 7190:1997, mas que apresentem relação entre o comprimento L e a altura da seção transversal h do corpo-de-prova < 21 .

- Avaliação da validade da equação proposta pela ABNT NBR 7190:1997 que relaciona o do módulo de elasticidade transversal (G) com o módulo de elasticidade longitudinal (E);

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

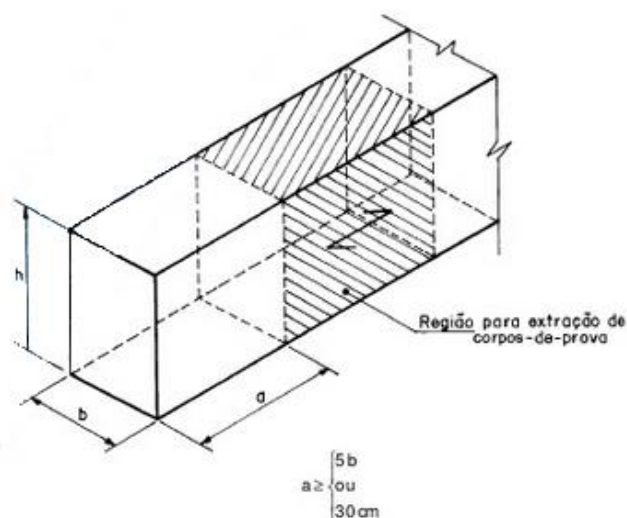
3.1. Caracterização da madeira

Segundo Ballarin e Nogueira (2003), os ensaios com a madeira para analisar o carregamento e os efeitos provocados na madeira, tiveram início em 1638, por Galileu e 1678, por Hooke.

Para Heamon (1966) *apud* Ballarin e Nogueira (2003) os primeiros indícios para se determinar os coeficientes da madeira foram realizados somente em 1920 por Jenkin e Canington.

A caracterização física da madeira, de acordo a ABNT NBR 7190:1997 para lotes considerados homogêneos, é válida quando o lote não for de volume superior a 12 m^3 . Destes lotes devem ser extraídos corpos de prova aleatoriamente, representando a totalidade do mesmo a ser analisado. Procurando evitar a retirada de mais de um corpo-de-prova de uma mesma peça, estes devem ser isentos de defeitos, retirados longe da extremidade, aproximadamente cinco vezes a menor dimensão da seção transversal da peça considerada, porém nunca deverá ser menor que 30 cm, como indica a Figura 1.

Figura 1: Esquema de extração de corpos-de-prova.



Fonte: ABNT NBR 7190: 1997.

A quantidade mínima de corpos de prova deve atender as seguintes especificações:

- caracterização simplificada: seis corpos de prova;
- caracterização mínima de resistências para espécies pouco conhecidas: doze corpos de prova;
- caracterização completa: não há recomendação na norma, mas para que a amostra seja representativa a experiência tem mostrado que devem ser utilizados pelo menos trinta corpos de prova.

3.1.1. Caracterização simplificada de madeira serrada

Para a ABNT NBR 7190:1997, a caracterização simplificada das madeiras usuais é feita com base no valor característico da resistência à compressão paralela às fibras, por ser esta a referência da norma de madeiras. No caso da compressão, admite-se um coeficiente de variação de 18%. Para esforços tangenciais o coeficiente de variação é de 28%. Assim para espécies mais conhecidas, na falta de determinação experimental, pode-se seguir as seguintes relações de 1 a 7 para obtenção dos valores característicos de resistência na compressão e tração:

$$\frac{f_{c0,k}}{f_{t0,k}} = 0,77 \quad (1)$$

$$\frac{f_{c90,k}}{f_{t0,k}} = 1,0 \quad (2)$$

$$\frac{f_{c90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25 \quad (3)$$

$$\frac{f_{e0,k}}{f_{c0,k}} = 1,0 \quad (4)$$

$$\frac{f_{e90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25 \quad (5)$$

Para coníferas:

$$\frac{f_{v0,k}}{f_{c0,k}} = 0,15 \quad (6)$$

Para dicotiledôneas:

$$\frac{f_{v0,k}}{f_{c0,k}} = 0,12 \quad (7)$$

3.2. Propriedades das madeiras

3.2.1. Resistência

Resistência é definida como a capacidade que a madeira tem de receber solicitações até o aparecimento de fenômenos específicos de comportamento além das restrições de emprego do material para elementos estruturais. A resposta a estas solicitações aparece de uma maneira geral como rupturas ou deformações específicas excessivas (ABNT NBR 7190: 1997).

Assim os valores de resistência estão relacionados com a capacidade última dos corpos de prova. Assim obtêm-se valores como f_{c0} , f_{t0} , f_{v0} , f_{M0} , entre outros.

3.2.2. Rigidez

A rigidez é determinada a partir do valor médio do módulo de elasticidade analisado dentro da fase de comportamento elástico linear (ABNT NBR 7190: 1997).

Assim a rigidez da madeira, está relacionada, portanto, com valores de módulo de elasticidade, seja ele transversal ou longitudinal.

3.2.2.1. Caracterização da rigidez da madeira

De acordo com a ABNT NBR 7190 (1997), para a caracterização da rigidez da madeira os métodos descritos acima têm de ser respeitados. Sua caracterização completa deve se referir à condição padrão de umidade ($U = 12\%$).

Para definição do valor médio do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras o $E_{c0,m}$ devem ser realizados pelo menos dois ensaios;

Os valores médios dos módulos de elasticidade na compressão e na tração paralela às fibras segundo a norma brasileira de madeiras podem ser considerado iguais, indicada na equação 8:

$$E_{c0,m} = E_{t0,m} \quad (8)$$

Na impossibilidade de realização do ensaio de compressão paralela, o módulo de elasticidade $E_{c0,m}$ pode ser avaliado através do ensaio de flexão com carga centrada no meio do vão, conforme descrito no item 2.3.2 da ABNT NBR 7190 (1997). Nesse caso o valor do módulo é determinado admitindo as relações 9 e 10:

$$\text{Para coníferas: } E_M = 0,85E_{c0} \quad (9)$$

$$\text{Para dicotiledôneas: } E_M = 0,90E_{c0} \quad (10)$$

Segundo a norma europeia UNI EN 338 (2009) a relação entre o módulo de elasticidade na flexão estática e na compressão paralela às fibras também diferem entre si de acordo com as relações 11 e 12:

$$\text{Para coníferas: } E_M = 0,67 E_{c0} \quad (11)$$

$$\text{Para dicotiledôneas: } E_M = 0,84 E_{c0} \quad (12)$$

3.2.2.2. Estimativa da rigidez

Para a determinação da rigidez efetiva, que seria correspondente a um valor de cálculo para o módulo de elasticidade na direção paralela às fibras, segundo a ABNT NBR (1997) devem ser considerados alguns coeficientes que consideram a classe de carregamento da madeira e o tipo de madeira (k_{mod1}), o teor de umidade da madeira (k_{mod2}) e se a madeira passou ou não por processo de classificação mecânica e visual 9 (k_{mod3}). A combinação destes três coeficientes multiplicada pelo valor do módulo de elasticidade médio da madeira fornece o valor da rigidez efetiva, conforme mostra a equação 13.

$$E_{c0, ef} = k_{mod,1} \times k_{mod,2} \times k_{mod,3} \times E_{c0,m} \quad (13)$$

O módulo de elasticidade efetivo é utilizado também para a determinação do módulo de elasticidade transversal, também com valor efetivo. Neste caso, a equação dada pela norma ABNT NBR 7190:1997 propõe que o módulo de elasticidade longitudinal (E) seja vinte vezes o módulo de elasticidade transversal (G):

$$G = \frac{E}{20} \quad (14)$$

Por outro lado, a norma europeia UNI EN 338 (2009) indica que a relação entre o módulo de elasticidade longitudinal (E) é 16 vezes maior que o módulo de elasticidade transversal (G), como indica a equação a seguir:

$$G = \frac{E}{16} \quad (15)$$

Com relação à determinação do módulo de elasticidade transversal (G) tanto em vigas de madeira como em corpos de prova de pequenas dimensões são poucas as pesquisas desenvolvidas, sendo que alguns valores experimentais do módulo G obtidos por diferentes pesquisadores geralmente diferem daquele proposto pela norma ABNT NBR 7190:1997.

Rocco Lahr (1983) investigou, com o auxílio do ensaio de flexão em três pontos, a influência da relação (L/h) entre o comprimento (L) e largura (h) de peças

de madeira serrada responsáveis por minorar significativamente o efeito das forças cisalhantes no cálculo dos deslocamentos. Nesse caso a obtenção do módulo de elasticidade longitudinal (E) esta baseado na teoria de vigas de Euler Bernoulli, que considera apenas a existência de esforços de flexão. O autor concluiu que para o correto emprego da teoria de vigas de Bernoulli, as peças devem respeitar a relação $L/h \geq 21$, a qual é utilizada pela norma brasileira ABNT NBR 7190:1997 na determinação do módulo e da resistência à flexão de corpos de prova, indicada na equação 16.

$$E_M = \frac{FL^3}{48 \delta I} \quad (16)$$

Onde:

δ : deslocamento vertical no meio do vão (mm),

F: carregamento centrado aplicado no meio do vão (N),

L: vão entre apoios (mm),

E_M : módulo de elasticidade na flexão (MPa)

I: momento de inércia da seção transversal sendo igual a $b \cdot h^3 / 12$ (mm⁴)

Segundo Molina (2008) a equação da teoria de vigas de Timoshenko leva em consideração a influência dos esforços cisalhantes no cálculo dos deslocamentos verticais da viga, conforme equação 17.

$$\delta = \frac{FL^3}{48 E_M I} + \alpha_s \frac{F L}{4 G A} \quad (17)$$

Onde

α_s : fator de forma que considera a distribuição das tensões de cisalhamento, sendo igual a 1,5;

E_M : módulo de elasticidade na flexão (MPa);

I : momento de inércia da seção transversal da viga (mm^4);

G : o módulo de elasticidade transversal (MPa);

A : área da seção transversal da viga (mm^2);

F : a carga concentrada no centro do vão da viga (N);

L : o vão considerado para a viga biapoiada (mm).

3.2.2.3. Correção dos valores de resistência e rigidez para umidade padrão

Valores especificados na norma correspondem a classe 1 de umidade, conhecida também como condição padrão de referência, definida como sendo o teor de 12% de umidade.

Para a caracterização usual das propriedades de resistência e rigidez da madeira analisada, os corpos de prova devem ter valores de umidade no intervalo de 10 a 20%, para que seja possível a correção dos valores de resistência e de rigidez para a umidade padrão, classe 1, através das equações 18 e 19.

$$f_{12} = f_{u\%} \times \left[1 + \frac{3 \times (U\% - 12)}{100} \right] \quad (18)$$

$$E_{12} = E_{u\%} \left[1 + \frac{2 \times (U\% - 12)}{100} \right] \quad (19)$$

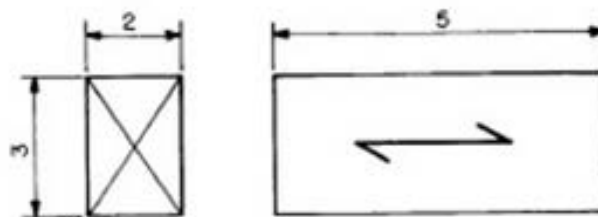
Admite-se que para umidades acima de 20%, as propriedades de resistência e rigidez não sofram grandes alterações.

A influência da temperatura nas propriedades de resistência e rigidez é considerada desprezível em temperaturas na faixa de 10°C e 60°C (ABNT NBR 7190: 1997).

3.2.3. Teor de umidade

Segundo a ABNT NBR 7190 (1997), para a realização dos testes de umidade, existe o conhecido método gravimétrico. Através deste método primeiramente é necessário confeccionar os corpos de prova (cp's), padronizados pela mesma, com dimensões de 2,0 cm x 3,0 cm, e comprimento ao longo das fibras de 5,0 cm, provindo da madeira a ser analisada, seguindo as especificações citadas no tópico 3.1 conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Corpo de Prova de Umidade



Fonte: ABNT NBR 7190: 1997.

Para a determinação da umidade a relação 20 é utilizada:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (20)$$

Onde:

U é a umidade da madeira, em porcentagem;

m_i é a massa inicial da madeira, em gramas;

m_s é a massa da madeira seca, em gramas.

Assim para a determinação de m_s os cp's são alocados dentro de uma estufa, cuja temperatura tem de ser 103 °C permitindo-se nesse acompanhamento variação tanto acima quanto abaixo de no máximo 2°C. Sendo assim, os cp's alocados terão de ser pesados de 6 em 6 horas, até que a variação entre o peso atual e o anterior seja menor ou igual a 0,5% duas vezes consecutivas. No fim desse processo, obtêm-se a massa que será considerada a massa seca (m_s).

Existem também outras maneiras de se determinar a porcentagem de umidade na madeira. Uma dessas maneiras é a utilização de medidores elétricos de contato. Estes não são tão precisos quanto ao método anterior proposto pela norma brasileira de madeiras, pois consideram muitas vezes a umidade superficial da madeira enquanto no seu interior a madeira pode ter uma umidade diferente.

3.2.4. Densidade

São definidos três tipos de densidade cada qual com suas peculiaridades, sendo estas a densidade básica, densidade aparente e a densidade real (ABNT NBR 7190: 1997).

3.2.4.1. Densidade básica

A densidade básica (ρ_{bas}) da madeira é determinada através do quociente massa seca por volume saturado, dada na equação 21 abaixo.

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad (21)$$

Onde:

m_s é a massa seca da madeira, dado em quilogramas;

V_{sat} é o volume saturado da madeira, dado em metros cúbicos.

3.2.4.2. Densidade aparente

A densidade aparente (ρ_{ap}) é determinada do mesmo modo que a densidade básica, no entanto para a umidade de referencia da norma de madeiras, ou sejam 12% (equação 22).

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (22)$$

Onde:

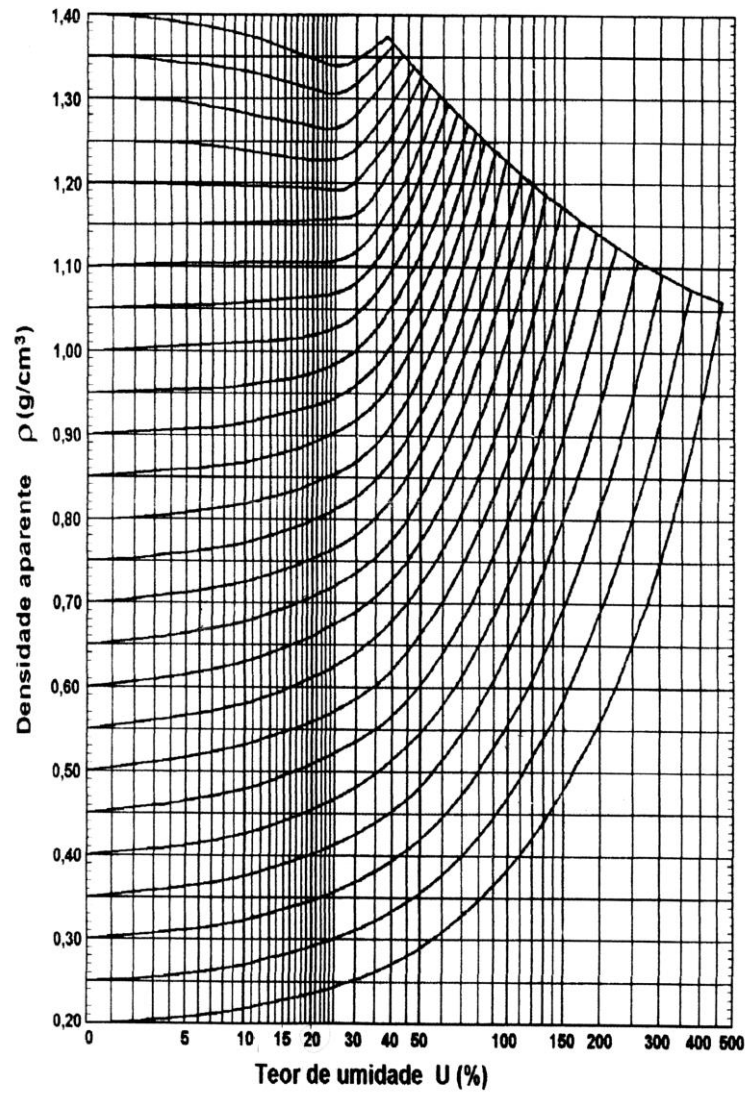
m_{12} é a massa da madeira analisada a 12 % de umidade, dada em quilogramas;

V_{12} é o volume de madeira analisado a 12% de umidade, dado em metros cúbicos (ABNT NBR 7190: 1997).

Vale mencionar também que a densidade aparente não se refere somente ao valor de 12%. Podem ser definidas outras densidades aparentes para outros níveis de umidade da madeira.

A correção dos valores da densidade aparente de um valor superior a 12% para a umidade de referência pode ser feito com a utilização do gráfico de Kollmann (Kollmann, 1968).

Figura 3 - Gráfico de Kollmann



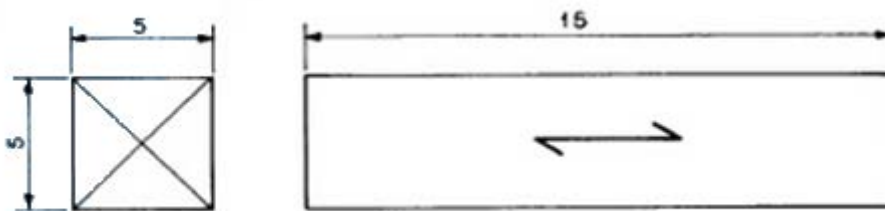
Fonte: Modificado de Kollmann (1968).

3.3. Ensaaios

3.3.1. Compressão paralela às fibras

Para a realização dos ensaios define-se a amostra da qual proverá o corpo-de-prova (cp). Uma vez definida a amostra, estes devem ter forma prismática com seção transversal quadrada de 5,0 cm de lado e 15,0 cm de comprimento. As dimensões devem ter exatidão de 0,1 mm, e estas são apresentadas de acordo com a Figura 4, seguindo especificações citadas no tópico 3.1.

Figura 4 - Corpo-de-prova de compressão paralela às fibras.



Fonte: ABNT NBR 7190: 1997.

Este ensaio tem como objetivo determinar a resistência ($f_{wc,0}$ f_{c0}) dada pela máxima tensão de compressão que atua no corpo-de-prova (cp) e a rigidez à compressão paralela às fibras determinada através do módulo de elasticidade obtido no trecho linear do diagrama tensão x deformação específica, expresso em megapascals, os quais são dados pelas equações 24 e 25, respectivamente:

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,m\acute{a}x}}{A} \quad (24)$$

Onde:

$F_{c0,m\acute{a}x}$. indica a máxima força aplicada na amostra durando o ensaio, dado em newtons;

A é a área inicial da seção transversal comprimida, dada em metros;

f_{c0} é a resistência à compressão paralela as fibras, dada em megapascals.

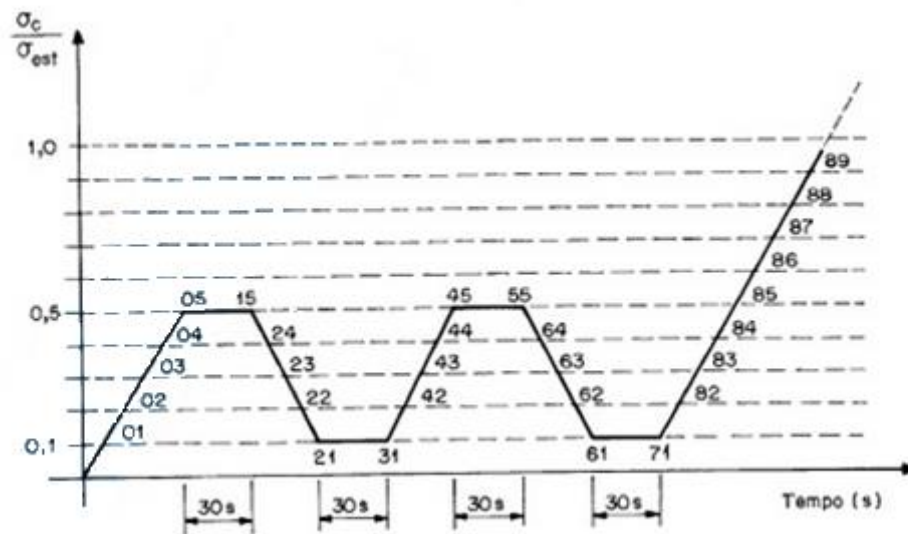
$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (25)$$

Onde:

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ são as tensões de compressão que correspondem a 10% e 50% da resistência f_{c0} , representadas pelos pontos 71 e 85 do diagrama de carregamento, descritos na Figura 5.

$\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ são as deformações específicas que correspondem as tensões $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$. (ABNT NBR 7190,1997).

Figura 5 - Diagrama de carregamento para análise da rigidez da madeira à compressão paralela as fibras



Fonte: ABNT NBR 7190: 1997.

3.3.1.1. Procedimento

Quando se quer determinar o módulo de elasticidade tem de se ter um medidor de deformação em pelo menos duas faces opostas do corpo-de-prova que esta sob ensaio. Para isso podem ser utilizados relógios comparadores, com precisão de 0,001 mm fixados por duas cantoneiras metálicas, os quais serão fixados no corpo-de-prova. As medidas de deformação específica podem também ser feitas com extensômetros com exatidão mínima de 50 $\mu\text{m/m}$.

Para um melhor ajuste da superfície do corpo-de-prova na máquina de ensaios, é indicado utilizar uma rótula entre o atuador e o corpo-de-prova. Esse procedimento ajuda a compensar possíveis distorções nos corpos de prova por efeitos de excentricidades.

Ainda segundo a ABNT NBR 7190 (1997) resistência deve ser determinada através de um carregamento gradativo crescente de aproximadamente 10 MPa/min.

Para que se possa determinar a rigidez da madeira, é necessário obter a resistência estimada ($f_{c0est.}$), através de um ensaio destrutivo de um corpo-de-prova da amostra a ser analisada. Com o conhecimento da resistência estimada ($f_{c0est.}$), são aplicados dois ciclos de carga e descarga, conforme especificadas na Figura 5, registrando as cargas e deformações do corpo-de-prova em cada ponto.

Para ensaios que utilizam transdutores de deslocamentos (extensômetros mecânicos) fixados diretamente no corpo-de-prova, recomenda-se realizar como apresentado anteriormente para o relógio comparador. Nesse caso, ao atingir 70% da carga estimada o mesmo seja retirado, e assim deve-se elevar o carregamento até que o corpo-de-prova (cp) seja rompido.

Para determinação do módulo de elasticidade, o diagrama de tensão x deformação específica deve ser construído para cada corpo-de-prova ensaiado. Os resultados obtidos, neste caso, devem ser apresentados e analisados em valores característicos para resistência e em valor médio para o módulo de elasticidade,

especificando junto a estes valores o teor de umidade à que foram submetidos no momento de ensaio (ABNT NBR 7190:1997).

3.3.1.2. Caracterização completa da resistência da madeira à compressão paralela às fibras

Para a caracterização das propriedades de resistência da madeira utilizada em projetos de estruturais, especificados nos tópicos anteriores, utiliza-se a condição padrão de umidade ($U=12\%$).

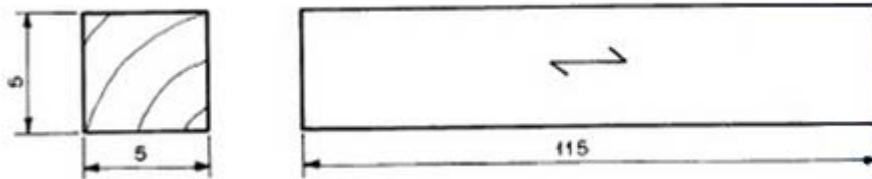
A resistência de compressão paralela às fibras (f_{wc} ou $f_{c,0}$), deve ser determinada a partir de ensaios de compressão uniforme com duração de 3 min à 8 min, com corpos de prova de seção quadrada de 5 cm de lado e 15 cm de comprimento.

A densidade básica é determinada conforme especificada no item 3.2.4.1 enquanto que a densidade aparente é determinada com os corpos de prova a 12% de umidade (ABNT NBR 7190: 1997).

3.3.2. Flexão

A amostra dos corpos de prova (cp) a serem ensaiadas devem seguir especificações do item 3.1, tendo estas forma prismática, com seção transversal quadrada de 5,0 cm e comprimento de 115,0 cm, com uma exatidão de 0,1 mm nas medidas, de acordo com a Figura 6.

Figura 6 - Corpo-de-prova de flexão



Fonte: ABNT NBR 7190: 1997.

Como pode ser observado para o corpo-de-prova (cp) da Figura 6, é indicado que o ensaio em questão seja realizado com o plano de flexão perpendicular à direção radial da madeira, não admitindo inclinações maiores de 6° das fibras em relação a comprimento do corpo-de-prova.

Este ensaio permite a determinação da resistência e rigidez da madeira na flexão. A resistência da madeira à flexão (f_{WM} ou f_M) é dada como um valor convencional da máxima tensão que atua em um corpo-de-prova sob ensaio de flexão simples, admitindo-se que a madeira seja um material elástico, dada pela equação 26:

$$f_M = \frac{M_{m\acute{a}x.}}{W_e} \quad (26)$$

onde:

$M_{m\acute{a}x.}$ é o momento máximo que atua no corpo-de-prova, dado em newtons-metro;

W_e é o módulo de resistência elástico da seção transversal do corpo-de-prova, dado por $bh^2/6$ (metros cúbicos).

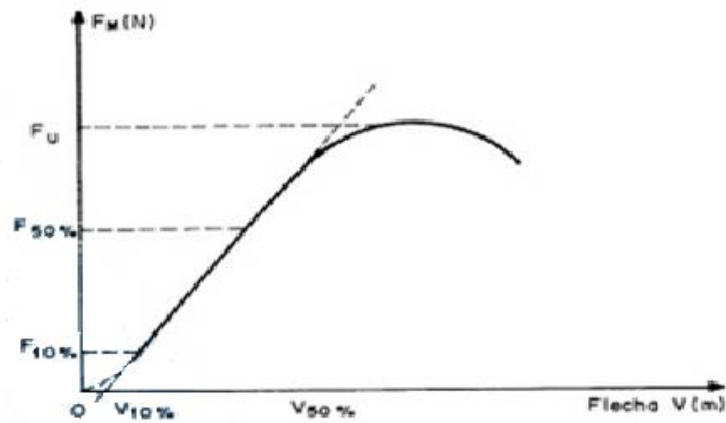
Onde:

b: base do corpo-de-prova analisado (metros)

h: altura do corpo-de-prova (metros)

A rigidez da madeira é determinada através do módulo de elasticidade indicado no trecho linear do diagrama carga x deslocamento, indicado na Figura 7:

Figura 7 - Carga x flecha na flexão



Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

Neste caso, o módulo de elasticidade é determinado pela inclinação da reta secante à curva carga x flecha na flexão, definida por $F_{10\%}$; $V_{10\%}$ e $F_{50\%}$; $V_{50\%}$, que correspondem, respectivamente, a 10% e 50% da carga máxima de ensaio estimada, pelo corpo-de-prova gêmeo, dado por:

$$E_{M0} = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%})L^3}{(v_{50\%} - v_{10\%})4bh^3} \quad (27)$$

Onde:

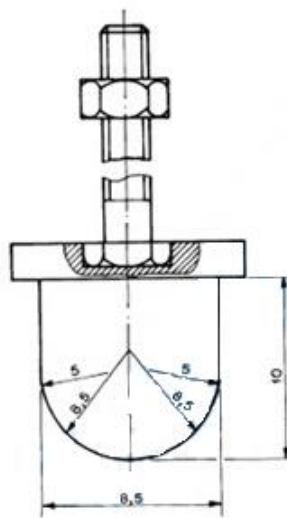
$F_{M,10\%}$ e $F_{M,50\%}$, representam as cargas à 10% e à 50% da carga máxima estimada, aplicada no corpo-de-prova, representadas pelos pontos 71 e 85 da Figura 6, dada em newtons;

$V_{10\%}$ e $V_{50\%}$, são os deslocamentos no meio do vão correspondentes as 10% e 50% da carga máxima estimada, dado em metros;

b e h correspondem, respectivamente, à largura e a altura da seção transversal do corpo-de-prova, dado em metros.

Para se efetivar o ensaio o corpo-de-prova tem de estar posicionado sobre dois apoios articulados móveis, em um vão livre de aproximadamente 21 vezes o h. O equilíbrio do sistema é dado pelo atuador, no centro do corpo-de-prova, sendo que este atuador (cutelo), atua com uma carga concentrada no centro do corpo-de-prova, apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Cutelo acoplado ao atuador

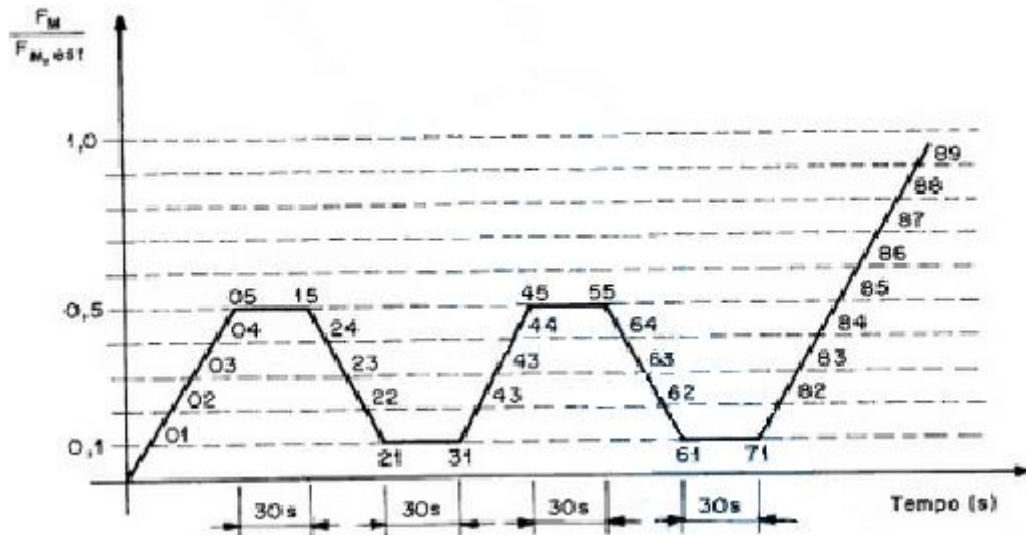


Fonte: ABNT NBR 7190: 1997.

Durante o ensaio a força a ser aplicada tem de crescer gradativamente a uma taxa de 10 MPa/min. Para casos em que a espécie que se deseja caracterizar seja pouco conhecida, devem ser utilizadas duas amostras, uma com o corpo-de-prova saturado e outra com corpo-de-prova com teor de umidade em equilíbrio com o ambiente. A determinação da umidade tem de ser realizada pelo método gravimétrico, conforme a ABNT NBR 7190:1997. Durante a determinação da rigidez, a resistência tem que ser estimada ($f_{M,est.}$) através da destruição de um corpo-de-prova gêmeo, selecionado da amostra a ser analisada. Com a resistência

estimada ($f_{M,est.}$) já conhecida, o carregamento deve ser aplicado com dois ciclos de carga e descarga, conforme indicado na Figura 9.

Figura 9 - Diagrama de carregamento para análise da rigidez da madeira à flexão



Fonte: ABNT NBR 7190: 1997.

As medidas do deslocamento transversal no meio do vão, devem ser feitas para cada ponto indicado na Figura de carregamento para determinação de resistência e rigidez da madeira, através de transdutores de deslocamento que possuam uma exatidão de 0,01mm.

Para determinar o módulo de elasticidade, devem ser construídos diagramas de carga x deslocamento para todos os ensaios realizados. Os resultados das propriedades de resistência convencional e rigidez à flexão devem ser apresentados como valores característicos para a resistência e com valores médios para o módulo de elasticidade, junto com o resultado do teor de umidade.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho experimental foi desenvolvido no Campus da Universidade Estadual de Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) de Itapeva/SP utilizou dos seguintes equipamentos e materiais:

- a) Máquina Universal de Ensaios EMIC, com capacidade de 30 ton;
- b) Máquinas da serraria para a confecção dos corpos-de-prova;
- d) Balança digital com capacidade para 300 kg;
- c) Paquímetro;
- d) Computador e softwares disponíveis na Unesp/Itapeva;
- e) Madeiras de Pinus e Eucalipto comercializadas região de Itapeva/SP;
- f) Medidor de umidade por contato.

Inicialmente, foi realizado um levantamento teórico sobre o tema com base na literatura nacional e internacional disponível.

Foram então confeccionados e ensaiados 7 corpos de prova de compressão (com dimensões de 5 cm x 5 cm x 15 cm) e 7 de flexão (5 cm x 5 cm x 115 cm) propostos pela ABNT NBR 7190:1997 na umidade $12\% \pm 1\%$, conforme Figura 10.

Figura 10 - Corpos-de-prova confeccionados e ensaiados



Fonte: Autor

No caso dos corpos de prova de flexão, para a avaliação das relações de rigidez na flexão e compressão, foram confeccionados corpos de prova que apresentassem relação entre a distância L entre apoios e a altura h da seção transversal maior que 21, ou seja, $L/h=21$. Esses corpos de prova foram usados para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal (E_{M0}).

Os corpos de prova tiveram, portanto, neste caso, dimensões de 5 cm x 5 cm x 115 cm. O valor de G , neste caso, foi obtido com o auxílio da equação (3) da teoria de vigas de Timoshenko. Posteriormente, diminuiu-se a distância entre os apoios para 75 cm para determinação do efeito dos esforços cisalhantes no cálculo dos deslocamentos. Foram consideradas 06 repetições de corpo-de-prova para cada propriedade a ser determinada (E , E_{M0} , G) experimentalmente, totalizando 54 ensaios realizados.

Quanto aos ensaios de compressão e de flexão, estes foram realizados a partir da utilização na Máquina Universal de Ensaio EMIC. Para os ensaios de flexão os carregamentos aplicados serão conduzidos até o limite de deslocamento vertical (flecha no meio do vão) de $L/200$ (sendo L a distância entre apoios) conforme recomendações da ABNT NBR 7190:1997. A Figura 11 mostra os detalhes da realização dos ensaios de flexão e de compressão paralela as fibras.

Figura 11 - Ensaio de compressão e flexão estática.



Fonte – Autor

As madeiras de reflorestamento utilizadas no projeto de pesquisa foram caracterizadas com base na ABNT NBR 7190:1997 a qual se refere à determinação da densidade para a umidade de 12%.

4.1. Módulo de elasticidade

4.1.1. Flexão estática

Ao todo foram confeccionados sete corpos de prova idênticos que representaram o lote de madeira analisado. As umidades das vigas variam entre si. Esta variação se foi devida a disposição na qual as peças foram alocadas e as condições climáticas onde foram armazenadas.

Dentre estes sete corpos de prova, um foi escolhido aleatoriamente para o teste na EMIC, no qual foi aplicada uma carga constante de 10 MPa/min, como indicado na ABNT NBR 7190 (1997), que o levou até a ruptura.

Esta carga máxima aplicada no corpo-de-prova de estimativa, de aproximadamente 5000 N foi tomada como base para os demais corpos de prova que passaram pelo ciclo de carregamento imposto pela ABNT NBR 7190: 1997.

Os seis corpos de prova foram submetidos aos ciclos de carregamento e rompidos. Em seguida ao atingir 70% da força estimada, a máquina emitiu um gráfico tensão x deformação específica foi promovida a retirada dos extensômetros.

4.1.2. Compressão paralela às fibras

Assim como na flexão estática, na compressão paralela foi necessário utilizar um corpo-de-prova como estimativa. Este também foi submetido a um carregamento de 10 MPa/min, e o valor encontrado serviu como base para os demais ensaios.

A força aplicada para rompimento do corpo-de-prova de estimativa foi de aproximadamente 95.000 N. Esta força foi utilizada como base para o ciclo de carregamento aplicado nos restantes corpos de prova para caracterização da madeira.

4.2. Análise do coeficiente entre o módulo de elasticidade transversal (G) e o módulo de elasticidade longitudinal (E_M).

Confeccionados os corpos de prova para determinação do módulo de elasticidade G, foram determinadas as umidades destes corpos de prova por meio do medidor de contato e realizados dois tipos de ensaios de flexão estática. O primeiro ensaio de flexão foi realizado com a distância entre apoios de 105 cm para determinação do módulo de elasticidade E_M convencionalmente. A carga foi aplicada até onde não houvesse ruptura do corpo-de-prova e se pudesse determinar o valor do módulo de elasticidade na flexão E_M . O segundo ensaio foi realizado na mesma peça de flexão, porém agora com o vão diminuído para 75 cm. Para o vão de 75 cm foi determinada a força P para o deslocamento (δ) correspondente a L/200, ou seja, 3,75 mm. Com os valores de E_M e P para os vãos de 105 cm e 75 cm, foi então utilizada a equação 17 para a obtenção de G (conforme equação 14).

O valor do coeficiente igual a 20 proposto pela norma ABNT NBR 7190 (1997) para relacionar os módulos de elasticidade transversal e longitudinal foi verificado pelo coeficiente α apresentado no item dos resultados.

Os corpos de prova foram mantidos em uma sala climatizada, a qual forçou sua secagem e manteve sua umidade dentro da margem estabelecida pela norma de 10% e 20%, para a correção dos módulos de elasticidades na condição padrão de referência (12%). As umidades foram medidas através do medidor de contato, ao longo dos corpos de prova para se ter uma média da respectiva umidade da peça.

Apresentadas as umidades e visto que todas se encontravam dentro da faixa estabelecida pela norma ABNT NBR 7190:1997, foi escolhido aleatoriamente um corpo-de-prova para estabelecimento da carga de ruptura. A carga máxima estimada foi de aproximadamente 4500N, e foi utilizada como base para o ensaio do restante dos corpos de prova no ciclo de carregamento, para uma distância entre apoios de 105 cm, na determinação do módulo de elasticidade (E_M).

5. RESULTADOS

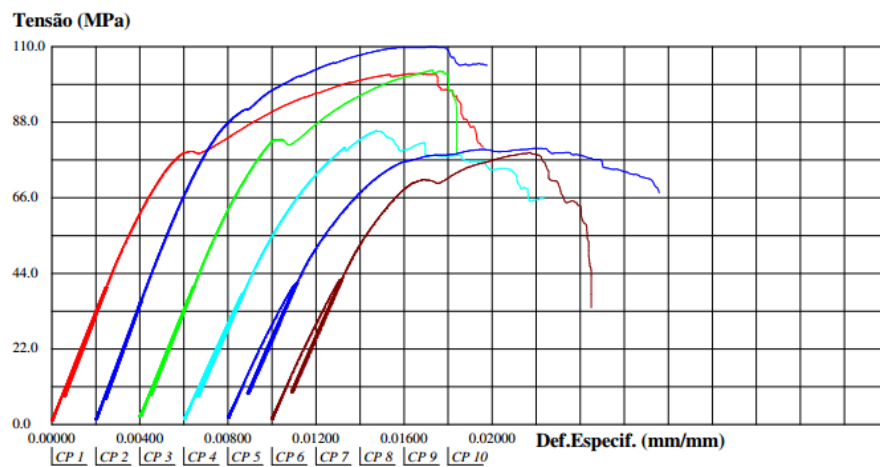
Os resultados experimentais encontrados neste estudo foram obtidos em função do valor médio e estes comparados entre si para todas as situações.

5.1. Flexão estática – Eucalipto saligna

Primeiramente foram ensaiados os corpos de prova para determinação da relação E_M e E_{c0} .

Os resultados foram obtidos através da máquina universal de ensaios, para flexão estática, são apresentados a seguir com a Figura 12 e a Tabela 1.

Figura 12 - Gráfico comparativo do ensaio de flexão (Eucalipto saligna) na EMIC.



Fonte: Autor

Tabela 1 - Resultados flexão estática e seus respectivos teores de umidade (Eucalipto saligna).

Corpo-de-prova	Tensão na ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade no último ciclo de carregamento(MPa)	Força máxima (N)	Teor de umidade do corpo-de-prova (%)
CP1	102,22	15629,50	7578,81	10,00
CP2	110,04	16775,38	9176,53	17,13
CP3	103,22	15481,87	7606,36	10,29
CP4	85,52	13504,32	6580,24	10,20
CP5	80,49	12247,26	5726,29	16,28
CP6	79,20	12510,34	5457,71	14,13

Fonte: Autor

Com os valores de rigidez obtidos, os quais foram relacionados na Tabela 1 foi necessária a correção dos mesmos para a umidade 12% para comparação dos resultados para um mesmo nível de umidade. Os valores corrigidos do módulo de elasticidade estão apresentados na Tabela 2, conforme equação 19.

Tabela 2 - Média do módulo de elasticidade de Flexão Estática a 12% de umidade (Eucalipto saligna)

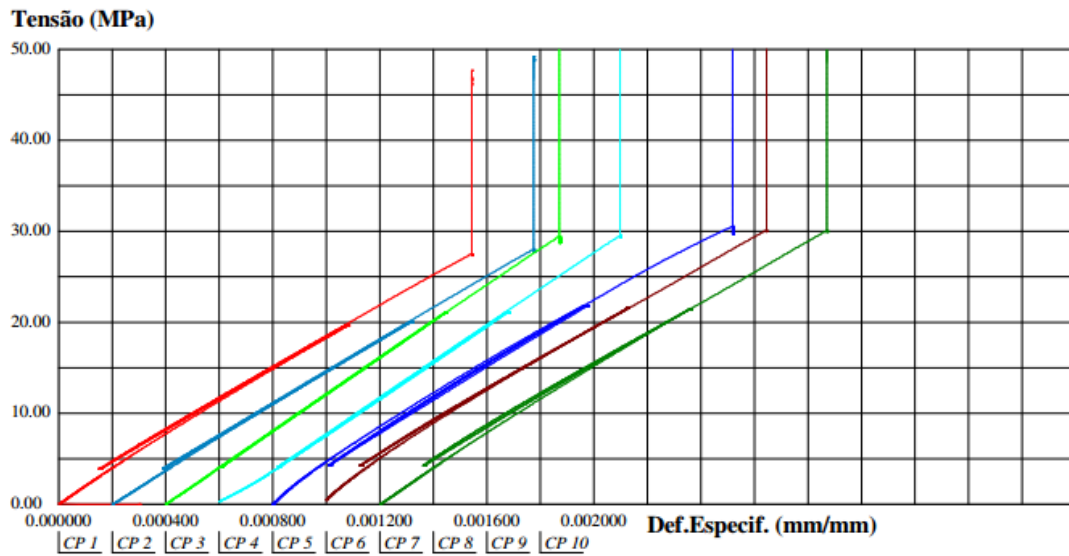
Corpos-de-prova	Módulo de elasticidade a 12% ($E_{M12\%}$) (MPa)
CP1	15004,32
CP2	18496,53
CP3	14952,39
CP4	13018,16
CP5	13295,63
CP6	13043,28
Média	14635,05

Fonte: Autor

5.2. Compressão paralela às fibras – Eucalipto saligna

Para determinação do módulo de elasticidade longitudinal na compressão (E_{c0}), a máquina universal de ensaios apresenta o diagrama força x deformação para os corpos de prova e em seguida a Tabela com os valores encontrados. Estes foram submetidos aos ciclos de carregamento e levados a ruptura.

Figura 13 - Diagrama Tensão x Deformação Especifica compressão paralela (Eucalipto saligna)



Fonte: Autor

Com base no diagrama da Figura 13 podemos observar que ao todo foram ensaiados sete corpos de prova, sendo um para estimativa. Portanto, são apresentados na Tabela 3 os resultados de um total de seis corpos de prova já que o CP7 foi descartado, neste caso.

Tabela 3 - Resultados compressão paralela com seus respectivos teores de umidade (Eucalipto saligna)

Corpo-de-prova	Módulo de Elást. (MPa)	Força Máxima (N)	Teor de umidade de ensaio (%)
CP1	23079,47	121252,69	10,31
CP2	23569,85	122706,61	10,14
CP3	20190,69	147990,36	12,23
CP4	34898,35	153857,59	11,58
CP5	21456,38	125583,51	12,71
CP6	21873,92	121056,77	17,96

Fonte: Autor

Foi realizada a correção dos módulos de elasticidade para 12% de umidade, através da equação 19 já utilizada para a correção dos módulos de elasticidade na flexão para Eucalipto Saligna. Os valores corrigidos para o ensaio de compressão paralela são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 -Média do módulo de elasticidade de Compressão Paralela às fibras a 12% de umidade
(Eucalipto saligna)

Corpos-de-prova	Módulo de elasticidade a 12% ($E_{c0,12\%}$) (MPa)
CP1	22299,38
CP2	22693,05
CP3	20283,57
CP4	34605,2
CP5	21924,13
CP6	22184,53
Média	23998,31

Fonte: Autor

Foram utilizadas as medias entre os módulos de elasticidade, tanto de flexão quanto o de compressão, encontrados a 12% de umidade, já corrigidos para a obtenção dos coeficientes das relações da ABNT NBR 7190 (1997).

5.2.1. Relação (E_M/E_{c0}) para Eucalipto saligna

Através dos resultados apresentados nas Tabelas 2 e 4, foi verificada a validade da Equação 10 proposta pela ABNT NBR 7190 (1997) para a espécie Eucalipto saligna, com relação ao coeficiente 0,9 que relaciona os módulos de elasticidade na compressão e na flexão.

Para tanto no lugar do coeficiente 0,9 da equação (10) adotou-se um β . Assim a Equação (10) se apresenta conforme equação (10.1):

$$E_M = \beta E_{c0} \quad (10.1).$$

Substituindo os valores médios dos módulos de elasticidade encontrados na flexão e compressão paralela, na equação 10, foi determinado um novo valor característico para β .

$$\beta = 14635,05 / 23998,31$$

$$\beta = 0,61$$

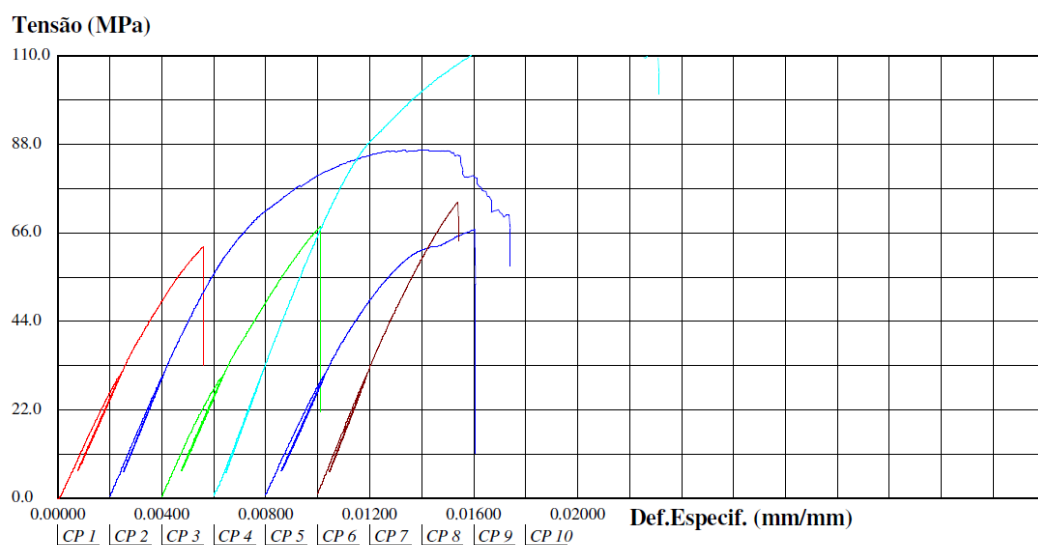
Perante os resultados de Eucalipto Saligna encontrados observou-se que em comparação com o 0,90 estabelecido pela norma ABNT NBR 7190 (1997) para madeiras dicotiledôneas encontra-se aproximadamente 32% menor.

Não foram encontrados outros trabalhos com a mesma finalidade de análise para com o coeficiente entre o módulo de elasticidade longitudinal na flexão (E_M) e o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}).

5.3. Flexão estática – Eucalipto grandis

Assim como foi feito para os corpos de prova de Eucalipto saligna, o procedimento idêntico de obtenção dos resultados foi feito para os corpos de prova do Eucalipto grandis. A seguir a máquina universal de ensaios apresenta os resultados de acordo com a Figura 14 e a Tabela 5.

Figura 14 – Diagrama Tensão x Deformação Espec. para flexão (Eucalipto grandis)



Fonte - Autor

Tabela 5 - Resultados flexão EMIC e seus respectivos teores de umidade (Eucalipto Grandis)

Corpo-de-prova	Tensão na ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade na fase final do ensaio (MPa)	Força máxima (N)	Teor de umidade de corpo-de-prova (%)
CP1	62,66	12951,92	4920,55	17,85
CP2	86,63	14626,39	6910,80	14,01
CP3	62,62	12392,92	5364,74	14,51
CP4	119,42	16897,93	9503,65	16,66
CP5	66,93	12890,29	9503,65	16,13
CP6	73,77	15524,65	5867,47	11,45

Fonte - Autor

A Tabela 6 apresenta os resultados corrigidos dos corpos de prova para a condição padrão de umidade a 12%.

Tabela 6 - Média do módulo de elasticidade de Flexão Estática a 12% de umidade (Eucalipto Grandis)

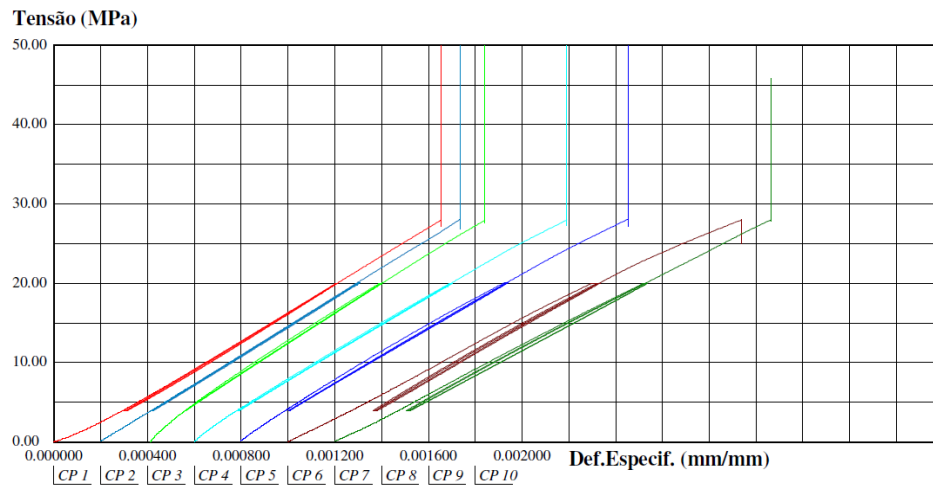
Corpos-de-prova	Modulo de elasticidade a 12% ($E_{M12\%}$) (MPa)
CP1	14467,29
CP2	15214,37
CP3	13015,04
CP4	18472,82
CP5	13955,03
CP6	15353,88
Média	15079,74

Fonte: Autor

5.4. Compressão paralela às fibras – Eucalipto grandis

A Figura 15 e a Tabela 7 a seguir apresentam os resultados obtidos através da máquina universal de ensaios para a compressão paralela às fibras.

Figura 15 – Diagrama Tensão x Deformação Especif. para Compressão Paralela às fibras (Eucalipto Grandis)



Fonte – Autor.

Tabela 7 - Resultados Compressão Paralela às fibras EMIC (Eucalipto grandis)

Corpo-de-prova	Módulo de Elást. (MPa)	Força Máxima (N)	Teor de umidade de corpo-de-prova (%)
CP1	17924,44	136286,83	14,02
CP2	18277,52	134997,89	13,94
CP3	28233,89	134832,91	14,09
CP4	18821,51	131599,19	14,71
CP5	18742,76	127212,73	14,61
CP6	16866,06	69901,52	13,84

Fonte - Autor

Os valores do módulo de elasticidade foram corrigidos a 12% de umidade, também, neste caso.

Tabela 8 -Média do módulo de elasticidade de Flexão Estática a 12% de umidade(Eucalipto Grandis)

Corpos-de-prova	Modulo de elasticidade a 12% ($E_{M12\%}$) (MPa)
CP1	18648,59
CP2	18986,69
CP3	29414,07
CP4	19841,64
CP5	19721,13
CP6	17486,73
Média	20683,14

Fonte: Autor.

5.4.1. Relação (E_M/E_{c0}) para Eucalipto grandis

Através dos resultados médios a 12 % de umidade apresentados nas Tabelas 6 e 8, foi utilizada a equação 10 apresentada no trabalho para verificar o coeficiente 0,9 da equação (10) para o caso do Eucalipto grandis. Foram substituídos os valores médios dos módulos de elasticidade á 12% de umidade e um novo valor característico para β (Equação 10.1) foi determinado para o Eucalipto Grandis para comparação com o valor fornecido pela ABNT NBR 7190 (1997).

$$\beta = E_{M12\%} / E_{c012\%} \quad (10.1)$$

$$\beta = 15079,74 / 20683,14$$

$$\beta = 0,73$$

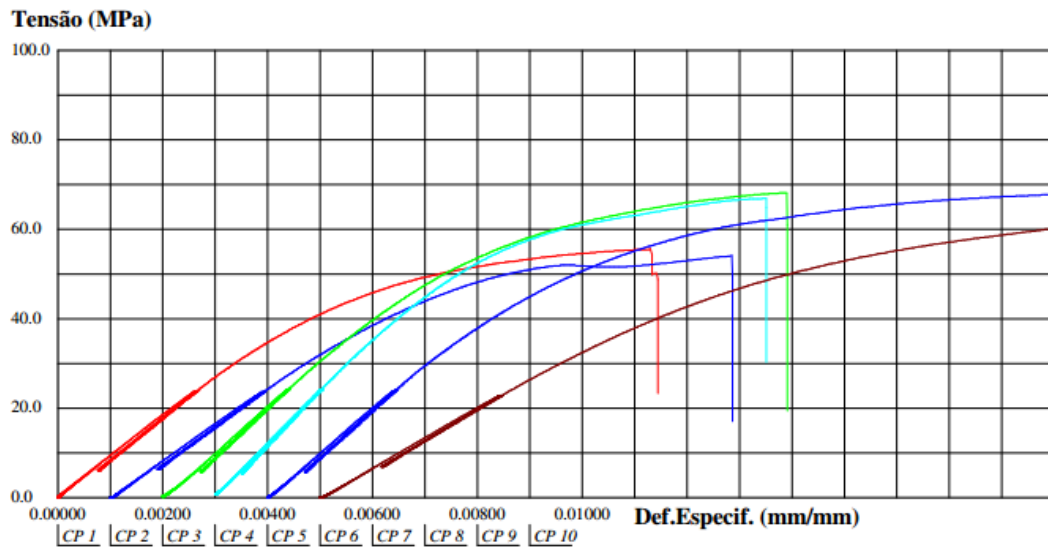
Os valores determinados de β para o Eucalipto Grandis em comparação com o encontrado na norma ABNT NBR 7190: 1997, foi de aproximadamente 21% menos do que o de 0,90 estimado.

Assim como citado na verificação anterior, nenhum trabalho com a mesma finalidade foi encontrado para comparação.

5.5. Flexão estática – Pinus elliottii

No caso das madeiras moles (softwoods) foram também ensaiados seis corpos de prova conforme visto na Figura 16. Através da máquina universal de ensaios, apresentando as curvas de tensão x deformação específica assim como nos ensaios anteriores, juntamente aos resultados obtidos apresentados na Tabela 9.

Figura 16 - Gráfico comparativo de flexão (Pinus elliottii)



Fonte: Autor

Tabela 9 - Resultados flexão EMIC e seus respectivos teores de umidade (Pinus elliottii)

Corpo-de-prova	Tensão na ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade no último ciclo de carregamento(MPa)	Força máxima (N)	Teor de umidade do corpo-de-prova (%)
CP1	55,62	8850,16	4417,82	16,82
CP2	54,15	8078,62	4276,64	18,77
CP3	68,23	10328,46	5399,17	18,49
CP4	66,96	11765,87	5378,51	18,37
CP5	67,91	9908,67	5423,28	17,69
CP6	62,23	6653,01	4972,20	17,18

Fonte: Autor

Foi necessária uma correção para os módulos de elasticidade da Tabela 9, trazendo todos estes para 12% de umidade.

Tabela 10 - Média do módulo de elasticidade de Flexão Estática a 12% de umidade (Pinus elliottii)

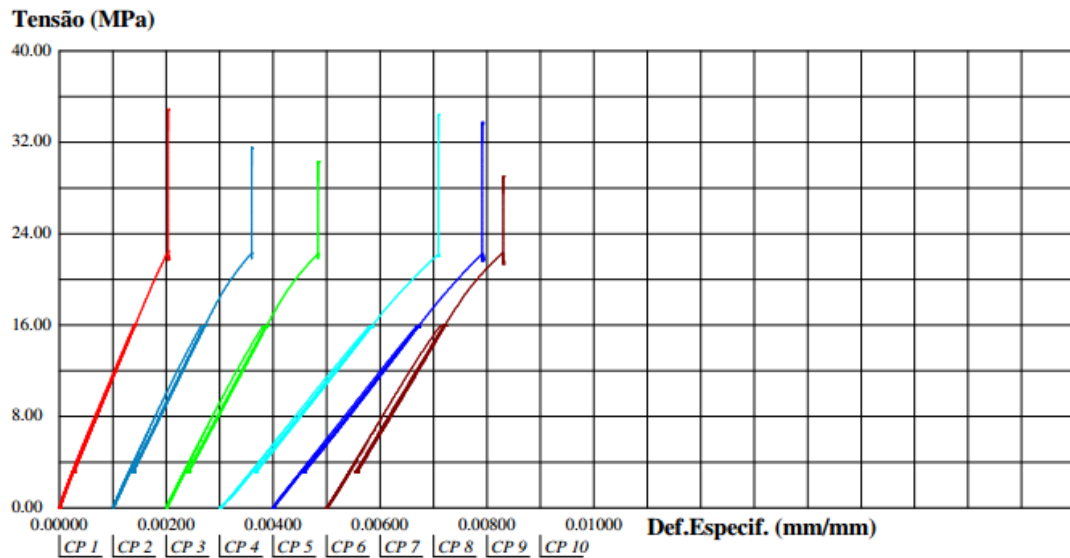
Corpos-de-prova	Modulo de elasticidade a 12% ($E_{M12\%}$) (MPa)
CP1	9703,315
CP2	9172,465
CP3	11669,09
CP4	13264,84
CP5	11036,28
CP6	7342,262
Média	10364,71

Fonte: Autor.

5.6. Compressão paralela às fibras – Pinus elliottii

O ensaio de compressão para o Pinus elliotti também foi realizado, segue a Figura 17 e a Tabela 11, para apresentação dos resultados obtidos através da maquina universal de ensaios.

Figura 17 - Diagrama Tensão x Deformação Especif. compressão paralela (Pinus elliottii)



Fonte: Autor

Tabela 11 - Resultados compressão EMIC com seus respectivos teores de umidade (Pinus elliottii)

Corpo-de-prova	Módulo de Elást. (MPa)	Força Máxima (N)	Teor de umidade de ensaio (%)
CP1	11830,20	86740,16	18,84
CP2	9653,97	79037,49	17,95
CP3	9170,62	76109,03	17,96
CP4	5855,65	86791,73	16,89
CP5	5867,91	84873,79	17,10
CP6	7816,88	72623,75	17,20

Fonte: Autor

Como os resultados obtidos não se encontravam na umidade padrão de referência, estes também foram corrigidos, conforme indica a Tabela 12.

Tabela 12 - Média do módulo de elasticidade de Compressão Paralela às fibras a 12% de umidade (Pinus eliottii)

Corpos-de-prova	Módulo de elasticidade a 12% ($E_{c0,12\%}$) (MPa)
CP1	13448,57
CP2	10802,79
CP3	10263,76
CP4	6428,333
CP5	6466,437
CP6	8629,836
Média	9339,95

Fonte: Autor

5.6.1. Relação (E_M/E_{c0}) para Eucalipto saligna

Através dos resultados apresentados nas Tabelas 10 e 12, foi verificado o coeficiente β para madeiras de pinus eliotti (equação 10.1)

$$\beta = 10364,71 / 9339,95$$

$$\beta = 1,11$$

O resultado β obtido acima para o Pinus eliotti, quando comparado com o da norma foi cerca de 30% superior ao da norma ABNT NBR 7190 (1997), estabelecido em 0,85.

Quanto a trabalhos relacionados que verificam esta relação não foram encontrados, nenhum de mesma natureza perante a literatura brasileira.

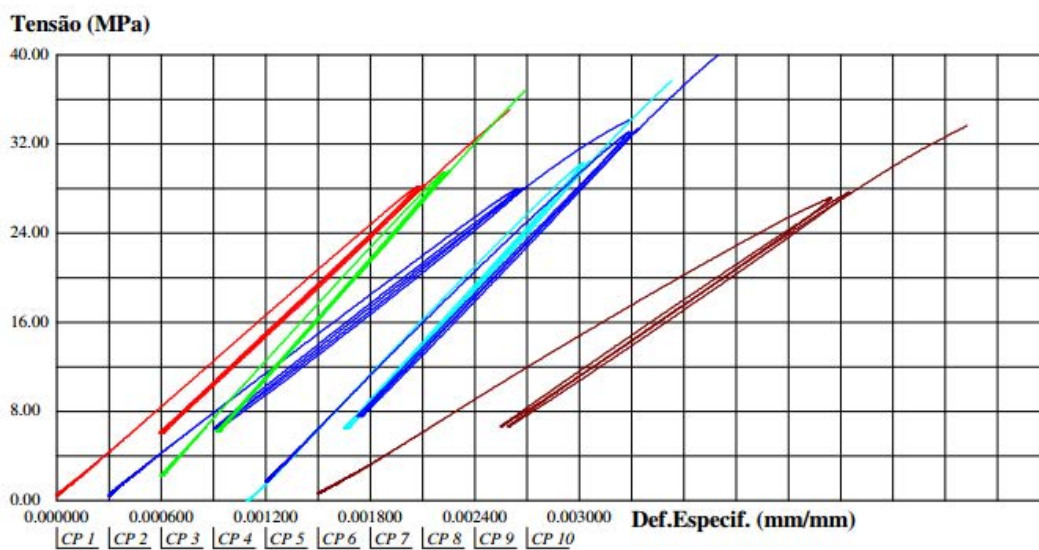
5.7. Estudo da relação 1/20 entre E_{co} e G

Para a análise da relação entre o módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras (E_{co}) e o módulo de elasticidade transversal (G), foi necessário realizar os testes de flexão tanto com a distância entre apoios (L) à 105 cm quanto a 75 cm, com o objetivo de capturar o módulo de elasticidade longitudinal (E_M) na primeira parte de ensaio e a força (F) na segunda parte, para a determinação do módulo de elasticidade transversal e posteriormente analisar a relação proposta .

5.7.1. Relação (E_{co}/G) para Eucalipto grandis

Seguem os valores encontrados através da máquina universal de ensaios para o ensaio de flexão de Eucalipto Grandis.

Figura 18 - Diagrama Tensão x Deformação Especifica para flexão estática (Eucalipto grandis).



Fonte – Autor

Segue a Tabela 13, com os valores dos módulos de elasticidades obtidos através dos ensaios realizados.

Tabela 13 - Resultados de flexão Estática EMIC e seus respectivos teores de umidade (Eucalipto grandis)

Corpo-de-prova	Módulo de Elást. (MPa)	Força Máxima (N)	Teor de umidade de ensaio (%)
CP1	13201,11	2281	16,50
CP2	11365,51	2281	18,41
CP3	16403,42	2281	17,83
CP4	15370,02	2281	19,58
CP5	14650,86	2281	17,83
CP6	8792,05	2281	16,17

Fonte - Autor

Os módulos de elasticidade foram corrigidos para a condição padrão de referência. Após a realização dos ensaios de flexão com 105 cm de distância entre apoios diminuiu-se a distancia entre apoios para 75 cm e foi aplicada o carregamento até que o corpo-de-prova apresenta-se uma flecha de aproximadamente $L/200$, ou 3,75 mm. A carga aplicada nos corpos de prova estão dadas na Tabela 14 a, apresentando também os valores do módulo de elasticidade transversal (G).

Tabela 14 - Determinação do módulo de elasticidade transversal (G) (Eucalipto grandis)

Corpos-de-prova	Força (P) para deslocamento (δ) à 3,75mm (N)	Módulo de elasticidade longitudinal a 12% ($E_{M12\%}$) (MPa)	Módulo de elasticidade transversal ($G_{12\%}$)
CP1	2754,68	14389,21	562,58
CP2	2103,89	12822,57	238,62
CP3	2971,61	18316,06	317,86
CP4	2658,27	17700,12	321,23
CP5	2358,70	16359,15	500,46
CP6	1979,93	9525,307	783,40
Média	2471,18	14852,07	454,02

Fonte - Autor

A Tabela 14 apresenta a média das forças (P) aplicadas para um deslocamento no centro do vão de 3,75 mm, do módulo de elasticidade longitudinal corrigido a uma umidade de 12% e do módulo de elasticidade transversal.

Os valores utilizados para a verificação do coeficiente utilizado na Equação 14 foram da Tabela 14. A equação 14 estabelece uma relação entre o módulo de elasticidade longitudinal (E_{c0}) e o módulo de elasticidade transversal (G), ambos valores efetivos propostos pela ABNT NBR 7190:1997. No entanto, utilizaram-se valores médios do módulo na flexão, os quais foram transformados em módulos de compressão pela relação 10 e dados da Tabela 14, já que não houve a necessidade da consideração do coeficiente de modificação k_{mod} para ensaios.

$$G_{ef12\%(médio)} = E_{c0,ef12\%(médio)} / 20 \quad (14)$$

Portanto, como o módulo de elasticidade E estabelecido pela norma, citado na Equação 14, foi adotado no trabalho o de compressão paralela às fibras, determinado através da equação 10, dado como $E_{c012\%(médio)}$.

$$E_{M12\%(médio)} = 0,90E_{c012\%(médio)}(10).$$

Com o valor de $E_{M12\%(\text{médio})}$ conhecido, o valor encontrado para $E_{c0(\text{médio})}$ foi de 16502,3 MPa. Assim fez-se a substituição do valor de 20 na equação 14 por α , e deixando o mesmo em evidência, foi determinado o valor de α da seguinte maneira.

$$G_{ef12\%(\text{médio})} = E_{c0,ef12\%(\text{médio})} / 20 \quad (14)$$

$$G_{ef12\%(\text{médio})} = E_{c0,ef12\%(\text{médio})} / \alpha \quad (14.1)$$

$$\alpha = E_{c0,ef12\%(\text{médio})} / G_{ef12\%(\text{médio})}$$

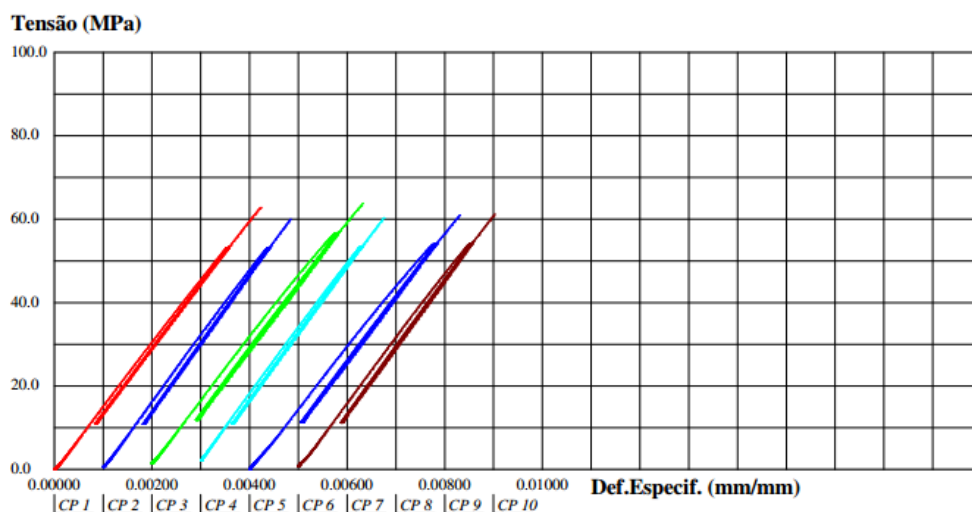
$$\alpha = 16502,3 / 454,02$$

$$\alpha = 36,35$$

5.7.2. Eucalipto Saligna

Como realizado anteriormente para o Eucalipto Grandis, da mesma maneira foi para o Eucalipto Saligna, passando exatamente pelas duas etapas descritas, apresentando os resultados obtidos pela máquina universal de ensaios através da Figura 19 e da Tabela 15.

Figura 19 - Diagrama Tensão x Deformação Especifica para flexão estática (Eucalipto saligna)



Fonte – Autor

Tabela 15 - Resultados Flexão Estática EMIC e seus respectivos teores de umidade (Eucalipto saligna)

Corpo-de-prova	Módulo de Elást. (MPa)	Força Máxima (N)	Teor de umidade de ensaio (%)
CP1	14878,16	4285	12,50
CP2	15464,19	4285	13,33
CP3	14344,72	4285	13,08
CP4	15384,62	4285	12,08
CP5	14100,82	4285	15,00
CP6	15059,49	4285	15,17

Fonte – Autor

Como os resultados obtidos estão fora da condição padrão de umidade estes foram corrigidos e apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Determinação do modulo de elasticidade transversal (G) (Eucalipto saligna)

Corpos-de-prova	Força (P) para deslocamento (δ) à 3,75mm (N)	Modulo de elasticidade longitudinal a 12% (EM12%) (MPa)	Modulo de elasticidade transversal (G12%)
CP1	3195,43	15026,94	-
CP2	3105,90	15875,54	626,12
CP3	2630,72	14654,57	422,97
CP4	3367,60	15409,24	-
CP5	2503,32	14946,87	347,55
CP6	2895,86	15984,14	536,97
Média	2949,81	15316,21	483,40

Fonte - Autor

Os valores de G obtidos para os corpos de prova CP1 e CP4 na Tabela 16 foram descartados por possíveis erros de leitura na obtenção dos mesmos e a média do valor de G12% foi obtida com base nos resultados dos corpos de prova CP2, CP3, CP5 e CP6.

De maneira semelhante aquela realizada no ensaio anterior, com o valor de $E_{M12\%(\text{médio})}$ conhecido, o valor encontrado para $E_{c0(\text{médio})}$ foi de 17018,01 MPa. Portanto substituindo o valor de 20 na equação 14 por α , e deixando o mesmo em evidência, foi determinado o valor de α da seguinte maneira.

$$G_{ef12\%(\text{médio})} = E_{c0,ef12\%(\text{médio})} / 20$$

$$G_{ef12\%(\text{médio})} = E_{c0,ef12\%(\text{médio})} / \alpha$$

$$\alpha = E_{c0,ef12\%(\text{médio})} / G_{ef12\%(\text{médio})}$$

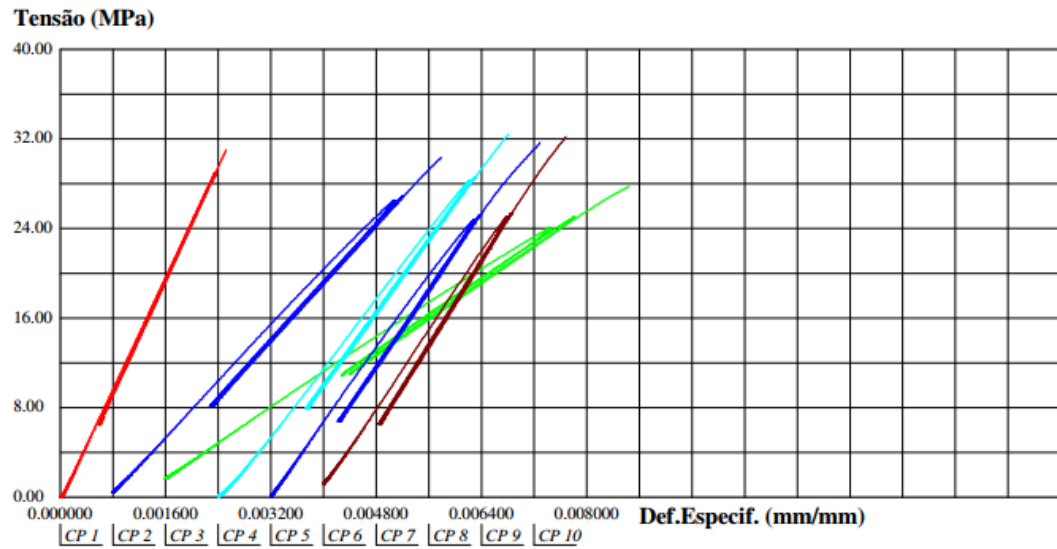
$$\alpha = 17018,01 / 483,40$$

$$\alpha = 35,20$$

5.7.3. Pinus elliotti

A carga máxima estimada para o Pinus elliottii para o ensaio de flexão a uma distância entre apoios de 105 cm no corpo-de-prova de estimativa, para determinação do módulo de elasticidade (E_M), sem que se rompesse o mesmo, foi de aproximadamente 4700N, força esta utilizada como base para o ensaio do restante dos corpos de prova no ciclo de carregamento, os resultados apresentados pela máquina universal de ensaios é apresentado pela Figura 20 e Tabela 17 .

Figura 20 - Diagrama Tensão x Deformação Especif. para Compressão Paralela às fibras (Pinus elliottii)



Fonte – Autor.

Tabela 17 - Resultados Flexão Estática EMIC e seus respectivos teores de umidade (Pinus elliottii)

Corpo-de-prova	Módulo de Elást. (MPa)	Força Máxima (N)	Teor de umidade de ensaio (%)
CP1	12524,65	2100	11,75
CP2	6121,92	2100	14,08
CP3	3682,73	2100	11,17
CP4	7655,44	2100	13,92
CP5	7820,14	2100	11,5
CP6	8571,59	2100	10,91

Fonte – Autor

Após a realização dos ensaios de flexão com 105 cm de distância entre apoios. Essa distância foi diminuída para 75 cm e aplicada uma certa carga até que o corpo-de-prova se desloque a uma altura de aproximadamente $L/200$, ou 3,75 mm. A carga aplicada nos corpos de prova é dada pela Tabela 18.

Tabela 18 - Determinação do modulo de elasticidade transversal (G) (Pinus elliottii)

Corpos-de-prova	Força (P) para deslocamento (δ) à 3,75mm (N)	Modulo de elasticidade longitudinal a 12% ($E_{M12\%}$) (MPa)	Modulo de elasticidade transversal ($G_{12\%}$)
CP1	2234,73	12462,03	350,40
CP2	1439,32	6376,60	-
CP3	819,52	3621,60	-
CP4	1308,47	7949,41	178,00
CP5	1435,88	7741,94	280,02
CP6	1869,74	8384,73	-
Média	1533,67	7756,05	269,47

Fonte – Autor

Nesse caso desconsiderou-se os resultados dos corpos de prova CP2, CP3 e CP6, devido também a algum possível erro de leitura da máquina.

$$E_{M12\%(\text{médio})} = 0,85E_{c012\%(\text{médio})} \quad (9.1).$$

Com o valor de $E_{M12\%(\text{médio})}$ conhecido, o valor encontrado para $E_{c012\%(\text{médio})}$ foi de 9124,77 MPa.

Portanto substituindo o valor de 20 na equação 12 por α , e deixando o mesmo em evidência, foi determinado o valor de α .

$$G_{ef12\%(m\u00e9dio)} = E_{c0,ef12\%(m\u00e9dio)} / 20 \quad (12)$$

$$G_{ef12\%(m\u00e9dio)} = E_{c0,ef12\%(m\u00e9dio)} / \alpha$$

$$\alpha = E_{c0,ef12\%(m\u00e9dio)} / G_{ef12\%(m\u00e9dio)}$$

$$\alpha = 9124,77 / 269,47$$

$$\alpha = 33,86$$

O valor experimental encontrado para o coeficiente α foi de 36,35 no caso de madeiras de Eucalipto Grandis, para o Pinus Elliotti foi de 33,86 e Eucalipto Saligna foi de 35,20, cerca de 82%, 70% e 76% respectivamente maiores que o valor de 20 proposto pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997)..

Para Christoforo *et al* (2013) o valor do coeficiente encontrado em ensaios para madeira de dimensões estruturais, de 2 a 4 metros de comprimento, mas com as mesmas relações propostas pela norma, para o Pinus Elliotti foi de 18,70 e Corymbia Citriodora foi de 21,16, sendo estes valores cerca de 6,50% inferior e 5,80% superior, respectivamente, ao estabelecido pela norma ABNT NBR 7190 (1997).

Segundo Zangi\u00e1como *et al* (2013) o valor determinado para o coeficiente foi de 56, cerca de 180% superior ao valor estabelecido pela ABNT NBR 7190 (1997), para madeiras roli\u00e7as de Corymbia Citriodora.

Lembrando que os valores encontrados tanto no trabalho quanto na literatura n\u00e3o podem ser generalizados em fun\u00e7\u00e3o da quantidade de corpos de prova necessitando de novos estudos de mesma natureza.

6. CONCLUSÃO

A análise dos coeficientes que relacionam as propriedades de rigidez de madeiras de Pinus Elliotti, de Eucalipto Grandis e saligna com base em ensaios experimentais mostrou que estes apresentam diferenças significativas com relação aos valores propostos pela norma de madeiras ABNT NBR 7190 (1997).

As relações normativas propostas pela ABNT NBR 7190 (1997) para entre o módulo de elasticidade na compressão (E_{c0}) e na flexão (E_M) são $E_M = 0,85.E_{c0}$ e $E_M = 0,90.E_{c0}$ para coníferas e dicotiledôneas, respectivamente. Os valores dos coeficientes 0,85 e 0,90, destas equações, foram comparados aos coeficientes $\beta = E_M/E_{c0}$, obtidos experimentalmente para madeiras de pinus e eucalipto, respectivamente.

A relação $G=E_{c0}/20$ entre o módulo de elasticidade na compressão (E_{c0}) e módulo transversal (G) foi estimada com base no coeficiente $\alpha = E_{c0}/G$.

Para madeiras de Eucalipto Saligna e de Eucalipto Grandis a relação $\beta = E_M/E_{c0}$ obtida experimentalmente foi de 0,61 e 0,73, respectivamente. Para madeiras de Pinus Elliotti o valor encontrado, neste caso, foi de 1,11.

Por outro lado, a relação $\alpha = E_{c0}/G$ para madeiras de Eucalipto Saligna e de Eucalipto Grandis foi de 35,20 e 36,35, respectivamente, enquanto que para madeiras de pinus elioti o valor encontrado foi de 33,86, neste caso.

Conclui-se que os valores encontrados se comprovados através de mais testes realizados da mesma natureza, comprovam que os valores estabelecidos pela ABNT NBR 7190 (1997), possui um coeficiente muito baixo em relação as espécies utilizadas no Brasil, mais especificamente na região sudeste.

7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar as relações propostas neste trabalho considerando um maior número de corpos de prova.

Realizar ensaios considerando equipamento de análise não destrutiva para obtenção do módulo de elasticidade na flexão.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BALLARIN, A. W., NOGUEIRA, M., **Caracterização elástica da madeira de eucalyptus citriodora**. *Revista cerne*. v. 9, n. 1, p 66-80, 2003.

BRITO, L. D. ; CALIL JR., C. Manual de projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 12, n. 56, p. 57-77, 2010.

CARREIRA, M. R.; SEGUNDINHO, P. G. A.; DIAS, A. A. Estimativa do módulo de elasticidade à flexão de toras de madeira por meio de vibração transversal livre. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, São Carlos, v.11, n.27, p.37-44, 2010.

CHRISTOFORO, A. L.; RIBEIRO, S. L. M. F.; PANZERA, T. H.; ROCCO, F. A. L.; . Metodologia para o cálculo dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal com vigas de madeira de dimensões estruturais. **Ciência rural, Santa Maria**, v.43, p. 610-615, 2013.

CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO, F. A. L.; MORALES, E. A. M.; ZANGIACOMO, A. L.; PANZERA, T. H. Influence of Displacements on Calculus of the Longitudinal Modulus of Elasticity of Pinus Caribaea Structural Round Timber Beams. **International Journal of Agriculture and Forestry**, v. 2, p. 157-160, 2012.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A.; COIADO, B. Propriedades mecânicas de peças com dimensões estruturais de Pinus spp: correlação entre resistência à tração e classificação visual. **Revista árvore** (Impresso), p. 741-750, 2009.

KOLLMANN, F.E.P.; CÔTÉ, W.A. (1984). **Principles of Wood science and technology**. v.1. Solid Wood. Reprint. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo. Springer-Verlag: 1968 – 1984.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de Eucalipto. **Revista Tecnológica**, Edição Especial ENTECA, p. 35-45, 2009.

MOLINA J. C. **Análise do comportamento da ligação formadas por barras de aço coladas para tabuleiros mistos de madeira e concreto para pontes**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2008. 240p.

NORMA EUROPEA . **UNI EM 338. Legnostrutturale, Classidiresistenza**. Milano, Italia, p.9, 2009.

PIGOZZO, J. C.; PLETZ, E.; LAHR, F.A.R. Aspectos da classificação mecânica de peças estruturais de madeira. In: **ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA**, 7., 2000, São Carlos, SP. Anais.

ROCCO Lahr, F. A. **Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1983. 216p.

ZANGIÁCOMO, A. L.; CHRISTÓFORO, A. L.; LAHR, F.A.R. Módulos de elasticidade longitudinal e transversal em vigas roliças de madeira de *Corymbia citriodora*. **VÉRTICES**, Campos dos Goytacazes/ RJ, v.15, p.63-68, 2013..