

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA

HELDER KENZO KONDO

**OBTENÇÃO DE CONSTANTES ELÁSTICAS DA MADEIRA
DE DUAS ESPÉCIES DE *Pinus sp***

Itapeva - SP
2011

HELDER KENZO KONDO

**OBTENÇÃO DE CONSTANTES ELÁSTICAS DA MADEIRA
DE DUAS ESPÉCIES DE *Pinus sp***

Trabalho de Graduação apresentado no Campus Experimental de Itapeva - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como requisito para a conclusão do curso de Engenharia Industrial Madeireira

Orientador: Prof^a. Dr^a. Elen Aparecida Martines Morales

Itapeva - SP
2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Kondo, Helder Kenzo

K821 Obtenção de constantes elásticas da madeira de duas
o espécies de pinus sp/ Helder Kenzo Kondo – – Itapeva,
2011
46 f.: il.

Trabalho de Graduação do Curso Engenharia
Industrial Madeireira apresentado ao Campus
Experimental de Itapeva – UNESP, 2008

Orientador: Prof^a. Dr^a. Elen Aparecida Martines
Morales.

Banca examinadora: Prof. Dr. Cláudio De Conti, Prof.
Dr. Higor Rogerio Favarim.

Inclui bibliografia

1. Madeira – Propriedades mecânicas. 2. Módulo de
elasticidade. 3. Conífera. Título. II. Itapeva - Curso
de Engenharia Industrial Madeireira.

CDD 620.12

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UNESP –
Campus Experimental de Itapeva.

As palavras-chave seguem:

1- Módulo de elasticidade longitudinal; 2- Módulo de elasticidade
transversal; 3-

Rigidez; 4- Propriedades mecânicas da madeira; 5- Pinus sp.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA

**OBTENÇÃO DE CONSTANTES ELÁSTICAS DA MADEIRA
DE DUAS ESPÉCIES DE *Pinus sp***

HELDER KENZO KONDO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL MADEIREIRA

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL MADEIREIRA

Prof. Dr. José Cláudio Caraschi
Coordenador de Curso

BANCA EXAMINADORA:

Prof^a. Dr^a. Elen Aparecida Martines Morales
Orientador – Campus Experimental de Itapeva/UNESP

Prof. Dr. Cláudio De Conti
Campus Experimental de Itapeva/UNESP

Prof. Dr. Higor Rogerio Favarim
Campus Experimental de Itapeva/UNESP

Dedicatória – Aos meus pais, exemplos que quero seguir para o resto de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por tudo o que tem me dado, e, nas horas mais difíceis, me guiar pelo melhor caminho.

Agradeço a minha mãe Marcia e meu pai Jorge por tudo aquilo que me ensinaram e por fazer de tudo para que eu nunca desistisse do melhor caminho, por abrir mão de muitas coisas para que hoje eu pudesse estar aqui apresentando este trabalho e por dar o amor que nunca será comparado a qualquer outro do mundo.

Aos meus familiares, que sempre me apoiaram e demonstraram o máximo de carinho e respeito por mim.

Meus irmãos Yuzo e Litsue que são exemplos de pessoas ao qual admiro e me espelho.

A minha orientadora, por cada segundo que passamos de aprendizado. Por sua paciência, sua orientação, que foi tão importante para o desenvolvimento do trabalho, pelas palavras e pela grande amizade que demonstrou comigo. Cada puxão de orelha foi válido e agradeço muito por isso, pois foram nesses momentos que mais cresci profissionalmente e como pessoa.

Ao Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr por ter auxiliado neste trabalho com toda sua experiência, conhecimento e pela disposição de seu tempo para melhor direcionar o desenvolvimento do trabalho.

Ao Brito, que esteve à disposição para me ajudar no que eu precisei.

Aos meus amigos Bárbara Barone Perez e Fábio Piva Pellis, que sempre estiveram ao meu lado, formando uma base sólida na qual nos apoiamos.

Ao Anderson, Bruno Batagin e Ulysses que me aguentaram todos estes anos. A todos os amigos que fiz na UNESP – Itapeva.

Agradeço a empresa RESISUL LDTA por todo material doado para a pesquisa e o todo apoio para o desenvolvimento do trabalho. Em especial ao Srs. Zico, Cláudio, José Roberto e Téo.

A Serraria São José por ter beneficiado as toras para facilitar todo o trabalho e transporte das mesmas.

Aos amigos, considerados parte da família, Bruninho, Lucas, Juninho, Victor, Vinicius, Neto e entre outros, que sempre estiveram ao meu lado e sempre dispuseram de tempo para conversas tanto de incentivo, para acalmar nos

momentos mais turbulentos e para auxiliar nas duvidas ao longo do desenvolvimento do trabalho.

As amigas, Caroline, Carolina, Juliana, Letícia, Isabella, entre outras, que sempre dispuseram de seu tempo para conversar nos momentos bons e principalmente nos ruins, nunca me deixando desanimar e com sinceras palavras de apoio.

A todos que participaram de alguma forma no desenvolver deste trabalho e no acréscimo de qualquer conhecimento.

RESUMO

Há muitos estudos sobre módulos de elasticidade longitudinal da madeira porém não se pode dizer o mesmo com relação ao módulo de elasticidade transversal, em especial para coníferas. O trabalho visou caracterizar e comparar as espécies *Pinus elliottii* var. *elliottii* e *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus cariabeae hondurensis* (híbrido), quanto aos módulos de elasticidade longitudinal (E) e transversal (G) na flexão estática, analisar o módulo de elasticidade longitudinal em diferentes vãos e verificar se para as espécies estudadas o vão ideal é igual a 21 vezes a altura do corpo de prova, como prescrito no documento normativo NB 7190/1997, assim como analisar a relação $G = E/20$ definida pelo mesmo documento normativo. A madeira foi proveniente da fazenda localizada no município de Paranapanema, desdobrada na serraria na região de Itapeva e todo o restante do trabalho foi conduzido no Campus Experimental de Itapeva - UNESP. Foram retirados quatorze corpos de prova de cada espécie. A média dos valores do módulo de elasticidade longitudinal e transversal foram, respectivamente, 5828 MPa e 452 MPa, para o *Pinus elliottii* var. *elliottii* e 6407 MPa e 320 MPa, para a espécie de *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus cariabeae hondurensis* (híbrido). As linhas de tendência para os gráficos plotados apresentaram um comportamento não linear até próximo ao vão igual a 21h e com uma variação sutil após esse ponto após este valor. Foram encontradas as relações $G = E/13$, para o *Pinus elliottii* var. *elliottii* e $G = E/20$ para o híbrido. Os resultados do módulo de elasticidade e resistência para o *Pinus elliottii* var. *elliottii* e para o híbrido foram inferiores aos resultados encontrados na literatura, mostrando-se neste lote qualidade inferior para se aplicar em estruturas.

Palavras-chave: Módulo de elasticidade longitudinal; Módulo de elasticidade transversal; Rigidez; Propriedades mecânicas da madeira; *Pinus* sp.

ABSTRACT

There are many studies about longitudinal modulus of elasticity of wood, but you can't say the same of transverse modulus, especially for conifers. The study aimed to characterize and compare the species *Pinus elliottii* var. *elliottii* and *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus cariabeae hondurensis* (hybrid), and the longitudinal modulus of elasticity (E) and lateral (G) in bending, to analyze the modulus of elasticity in different spaces and to verify the species studied the ideal range is equal to 21 times the height of the specimen, as prescribed in the normative document NBR 7190/1997, as well as analyzing the relationship $G = E/20$ defined in the normative document NBR 7190/1997. The wood came from the farm located in Paranapanema, split at the mill São José and the rest of the work was conducted at the Experimental Itapeva Campus - UNESP. Were removed fourteen specimens of each species. The average values of the modulus of elasticity and cross were, respectively, 5828 MPa and 452 MPa for *Pinus elliottii* var. *elliottii* and 6407 MPa and 320 MPa for the species of *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus cariabeae hondurensis* (hybrid). The trend lines for the plotted graphs showed an exponential behavior to near linear 21he will equal the constant after this value. We have found the relationship $G = E/13$, for *Pinus elliottii* var. *elliottii* and $G = E/20$ for hybrid. The results of the modulus and strength for *Pinus elliottii* var. *elliottii* and the hybrid were lower than those reported in the literature, showing that this batch inferior quality to apply to structures.

Keywords: Longitudinal modulus of elasticity; Transverse modulus of elasticity; Stiffness; Mechanical properties of wood; *Pinus sp.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Caso de estado de tensões mais geral. Fonte: BEER; JOHNSTON, 2005.	18
Figura 2 – Tensões perpendiculares aos eixos x e y. Fonte: BEER; JOHNSTON, 2005.	18
Figura 3 - Deformação em forma de rombóide. Fonte: BEER; JOHNSTON, 2005. ...	19
Figura 4 – Gráfico E_a (%) x l/h com cargas em ângulos quaisquer em relação aos anéis de crescimento. Fonte: ROCCO, 1983.	23
Figura 5 – Corpo de prova para ensaio de flexão. Fonte: ABNT-NBR 7190/1997, Anexo B.....	26
Figura 6- Diagrama de carregamento para determinação da rigidez à flexão estática. Fonte: ABNT-NBR 7190/1997, Anexo B.	27
Figura 7 – Diagrama força aplicada x flecha na flexão. Fonte: ABNT-NBR 7190/1997, Anexo B.....	27
Figura 8 – Arranjo do ensaio de flexão estática para a determinação do valor do módulo de elasticidade. Fonte: CEN 408.	35
Figura 9- Corte e transporte dos blocos. a) Corte da tora para confecção do bloco; c) Movimentação dos blocos com auxílio da grua.	37
Figura 10- Tratamento dos pranchões: a) Tanque com <i>Osmotox Plus</i> ; b) Pranchões recebendo tratamento.	38
Figura 11 – Acondicionamento dos pranchões: a) Pranchões em local coberto; b) Pilha dos pranchões tabicados.	38
Figura 12- Desenho esquemático dos pranchões.	39
Figura 13 – Máquinas para beneficiamento da madeira. a) Resserra ; b) Desempenadeira ; c) Desengrossadeira.	41
Figura 15 – Corpos-de-prova.	42
Figura 16 – EMIC, modelo DL com capacidade de 30 toneladas.....	43
Figura 17 - Porcentagens de perda do módulo de elasticidade aparente pela variação do vão de 5h a 23h para a espécie <i>Pinus elliotii</i> var. <i>elliotii</i>	46

Figura 18 - Porcentagens de perda do módulo de elasticidade aparente pela variação do vão de 5h a 23h para a espécie <i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i> x <i>Pinus caribaeae hondurensis</i> (híbrido).....	46
Figura 19 - Valores médios dos módulos de elasticidade pela variação do vão de 5h a 23h	47
Figura 20 – Valores médios das porcentagens de perda do módulo de elasticidade aparente pela variação do vão.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros elásticos preditos como função de E_L para coníferas.	20
Tabela 2 – Valores médios de E_a para seis corpos-de-prova.....	21
Tabela 3 – Valores de E para espécies de Pinus.....	22
Tabela 4 – Valores de G para carga aplicada tangencialmente e radialmente.	23
Tabela 5- Dimensões dos pranchões.....	40
Tabela 6: Valores dos ensaios realizados para comparação.	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	15
2.1. Objetivo geral	15
2.2. Objetivos específicos.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Pinus	16
3.2 Módulos de Elasticidade Longitudinal (E) e Transversal (G).....	17
3.3 Trabalhos sobre constantes elásticas da madeira	20
3.4 Documentos Normativos	25
3.4.1 Nacionais.....	25
3.4.1.1 ABNT – NBR 7190	25
3.4.1.2 ABNT – NBR 6230	28
3.4.2 Internacionais	30
3.4.2.1 AFNOR B 51-016	30
3.4.2.2 ASTM D-143.....	31
3.4.2.3 COPANT R-555.....	31
3.4.2.4 ISO 3349 e 3133	33
3.4.2.5 CEN 408.....	34
3.4.3 Considerações finais sobre a revisão bibliográfica.....	36
4. MATERIAIS E MÉTODO	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
6. CONCLUSÃO.....	49
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1. INTRODUÇÃO

Os estudos sobre a madeira são de grande importância devido às várias utilizações às quais a mesma pode ser empregada, em especial, em estruturas de madeira e construção civil, bem como devido à diversidade de espécies que se pode dispor.

Com isso, é de fundamental importância a caracterização da madeira, quer seja de espécies ainda não estudadas ou das já existentes no mercado, pois suas propriedades, físicas ou mecânicas, variam de acordo com o local de plantio, tipo de cultivo, solo, condições climáticas etc, variáveis essas que nem sempre são todas explicitadas

Busca-se, de forma geral, determinar constantes elásticas da madeira de pinus, em especial os valores dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal, já que são poucas as pesquisas e resultados encontrados em literatura sobre esta segunda propriedade.

Os trabalhos, especialmente nacionais, que abordam o estudo dos módulos de elasticidade transversal foram realizados somente com madeira de folhosas, não havendo assim dados para coníferas, exceto para *Araucária angustifolia*. Como o módulo de elasticidade longitudinal pode ser calculado mais facilmente do que o transversal é interessante a investigação de uma relação entre essas duas constantes elásticas para uma melhor utilização na área de estruturas.

Por outro lado, a existência de novos híbridos, como é o caso do *Pinus elliotii* var. *elliotii* x *Pinus cariabeae hondurensis*, a ser utilizado neste trabalho, trazem a necessidade de ensaios para caracterizá-los físico-mecanicamente e da comparação de suas propriedades com as de madeiras de outras espécies de pinus.

Estuda-se, assim, um tema muito importante para as áreas de propriedades mecânicas da madeira e estruturas de madeira, bem como procura-se contribuir com a determinação de valores de constantes elásticas de uma espécie tão utilizada e abundante na região de Itapeva/SP.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Este trabalho visa determinar constantes elásticas da madeira de pinus, em especial os valores de módulos de elasticidade longitudinal e transversal de madeiras das espécies *Pinus elliottii* var. *elliottii* e *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus cariabeae hondurensis* (híbrido) para utilização em área de estruturas.

2.2. Objetivos específicos

✓ Caracterizar e comparar os resultados encontrados de módulos de elasticidade da madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii* e *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus cariabeae hondurensis* (híbrido) com o intuito de verificar estas espécies oriundas de região próxima a Itapeva, com idades de 19 e 12 anos, respectivamente, podem ser utilizadas na área de estruturas;

✓ Analisar os resultados dos módulos de elasticidade longitudinal das espécies *Pinus elliottii* var. *elliottii* e *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus cariabeae hondurensis* (híbrido) em diferentes vãos no ensaio de flexão estática e verificar se para as mesmas vale a relação $l = 21h$ para não haver influência do módulo de elasticidade transversal, definida no documento normativo NBR 7190/1997;

✓ Analisar a relação $G=E/20$ definida no documento normativo NBR 7190/1997, para as espécies *Pinus elliottii* var. *elliottii* e *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus cariabeae hondurensis* (híbrido).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica contém tópicos sobre a madeira de pinus, prescrições para o ensaio de flexão estática contidos em diversos documentos normativos nacionais e internacionais, de forma resumida e sínteses de trabalhos que abordem este tema.

3.1 Pinus

Espécies de *Pinus* vêm sendo plantadas no Brasil há mais de um século. Muitas delas foram trazidas pelos imigrantes europeus, para fins ornamentais e para a produção de madeira. As primeiras introduções de que se tem notícia foram estabelecidas no Rio Grande do Sul, com *Pinus canariensis*, proveniente das ilhas Canárias, em torno de 1880.

Em 1948, por iniciativa do Serviço Florestal do Estado de São Paulo, foram introduzidas as espécies americanas conhecidas nas origens como “pinheiros amarelos”, que incluem *P. palustres*, *P. echinata*, *P. elliottii* e *P. taeda*. Dentre essas, as duas últimas se destacaram pela facilidade nos tratamentos culturais, rápido crescimento e reprodução intensa no Sul e Sudeste do Brasil (SHIMIZU, 2008).

Nos últimos anos a utilização de *Pinus* na indústria madeireira brasileira tem sido crescente. As estimativas indicam que 35% do volume de madeira serrada produzida são formados de madeira desse gênero e no país existem, aproximadamente, 1,5 milhões de hectares de plantações. Portanto, tratam-se de espécies fundamentais para o fornecimento de matéria-prima, com destaque as Regiões Sul e Sudeste (BALLARIM; PALMA, 2003).

Segundo Stamato (2008) para uma classificação estrutural eficiente, requer-se que as peças de madeira também sejam classificadas em função de suas dimensões e de seu uso. No caso da inclinação das fibras em torno do nó, isso é uma complicação adicional da determinação correta das razões de resistência para peças de flexão. Esses desvios das fibras são frequentemente ignorados, mas quando estão presentes podem resultar reduções expressivas na resistência. Além dos desvios de fibras ao redor dos nós, o desvio de fibras devido ao processamento

da madeira, durante o desdobro da tora, também pode acarretar redução da resistência da peça.

Com isso, Stamato (2008) ressalta a necessidade de classificação prévia das peças, como forma de minimizar os efeitos da grande variabilidade das propriedades e da ocorrência de defeitos naturais e de processo. Essa classificação deve ser feita quanto às dimensões das peças e quanto ao uso final, já que os defeitos naturais interferem diferentemente nas resistências à tração, flexão, etc.

3.2 Módulos de Elasticidade Longitudinal (E) e Transversal (G)

As estruturas são projetadas de modo a sofrerem apenas pequenas deformações, que não ultrapassem os valores do diagrama tensão-deformação correspondentes ao trecho linear do diagrama. Na parte inicial do diagrama, a tensão σ é diretamente proporcional à deformação específica ε e pode-se escrever como a Equação 1:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

Essa relação é conhecida como *Lei de Hooke*, e se deve ao matemático inglês Robert Hooke (1635-1703). Como a deformação específica é uma grandeza adimensional, o módulo de E é expresso na mesma unidade de σ , Pascal ou seus múltiplos no SI, e psi ou ksi no Sistema Inglês de unidades. Ao maior valor da tensão σ para o qual a Lei de Hooke é válida se denomina *limite de proporcionalidade* do material (BEER; JOHNSTON, 2005).

A definição de módulo de elasticidade transversal é definida observando a Figura 1, onde a mesma mostra um caso de estado de tensões mais geral, onde estão presentes as tensões de cisalhamento τ_{xy} , τ_{zx} e τ_{yz} . Essas tensões não têm nenhum efeito direto nas deformações específicas, e enquanto as deformações permanecem pequenas, não vão influenciar a dedução nem a validade das equações. As deformações de cisalhamento tenderão a deformar o cubo elementar em um paralelepípedo oblíquo.

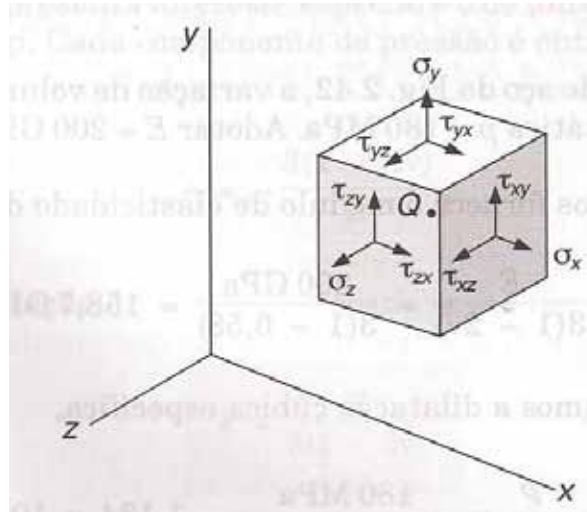


Figura 1 – Caso de estado de tensões mais geral. Fonte: BEER; JOHNSTON, 2005.

Tome-se inicialmente um cubo elementar de lado unitário, sujeito apenas às tensões de cisalhamento τ_{xy} e τ_{yx} , aplicadas às faces do cubo, perpendiculares, respectivamente, aos eixos x e y , Figura 2.

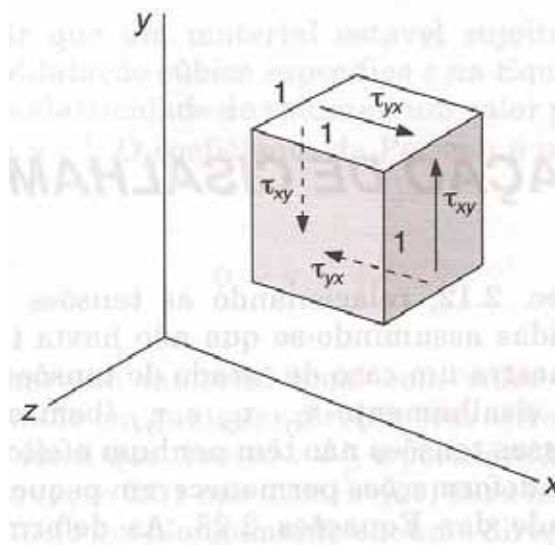


Figura 2 – Tensões perpendiculares aos eixos x e y . Fonte: BEER; JOHNSTON, 2005.

O elemento se deforma assumindo a forma de um romboide de lado unitário, Figura 3.

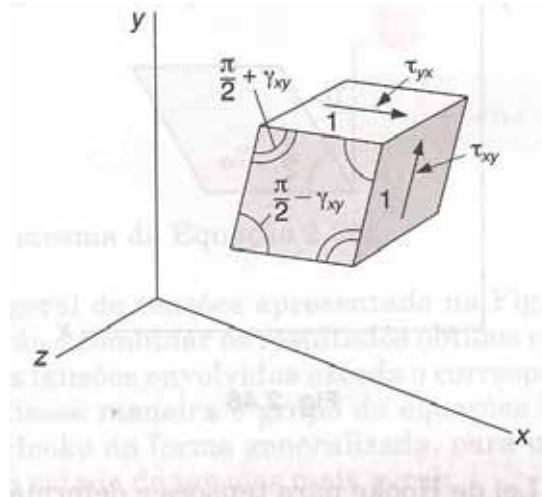


Figura 3 - Deformação em forma de romboide. Fonte: BEER; JOHNSTON, 2005.

Dois dos ângulos formados pelas quatro faces do cubo que estão sob tensão se reduzem para o valor $\frac{\pi}{2} - \gamma_{xy}$, enquanto os outros dois aumentam do valor $\frac{\pi}{2}$ para o valor $\frac{\pi}{2} + \gamma_{xy}$. O pequeno ângulo γ_{xy} define a distorção do cubo e é chamado de deformação de cisalhamento correspondente às direções x e y. Quando a deformação provoca uma redução no ângulo formado pelas faces orientadas segundo os eixos x e y, respectivamente, a deformação de cisalhamento γ_{xy} é positiva, de modo contrário ela é negativa. Marcando em um gráfico os valores τ_{xy} e os valores correspondentes de τ_{yx} , obtém-se o diagrama tensão-deformação de cisalhamento, para o material em estudo. O diagrama é semelhante àquele das tensões normais obtidos para o mesmo material por um teste de tração. Para os valores de tensão que não excedam o limite de proporcionalidade no cisalhamento, escreve-se a Equação 2:

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} \quad (2)$$

Essa relação é a Lei de Hooke para tensões e deformações de cisalhamento, e a constante G é chamada módulo de elasticidade transversal do material (BEER; JOHNSTON, 2005).

3.3 Trabalhos sobre constantes elásticas da madeira

Bodig; Jayne (1982), encontraram valores para os módulos de elasticidade transversal para um módulo de elasticidade longitudinal, para coníferas, igual a 6000 MPa. Esses valores são indicados na Tabela 1, onde E_L , E_R , E_T , significam, respectivamente, os módulos de elasticidade longitudinais nos planos longitudinal, radial e tangencial, e G_{LR} , G_{LT} e G_{RT} os módulos de elasticidade transversal nos planos longitudinal radial, longitudinal tangencial e radial tangencial, em MPa.

Tabela 1: Parâmetros elásticos preditos como função de E_L para coníferas, em MPa.

E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}
6000	699	366,7	656,4	618,5	51,8

Fonte: BODIG; JAYNE, 1982. Adaptada.

Rocco (1983), determinou o valor do módulo de elasticidade longitudinal aparente para a espécie *Pinho do paraná*, utilizando-se de seis corpos-de-prova de dimensões de 4 x 15 x 120 cm, ensaiados á flexão com carga central variando-se a relação b/h. Para cada b/h foram feitos ensaios variando-se l/h de 26 a 6, onde b, h, e l significam, respectivamente, largura, altura e vão livre do corpo de prova de flexão estática. A madeira estava com umidade em torno de 11 a 12%.

Estes valores são apresentados na Tabela 2, onde E_a representa o módulo de elasticidade aparente, já que para vãos menores do que 21h encontrou que há deformações devidas á esforços cortantes no calculo da flecha e, portanto, essas medidas não refletem o módulo de elasticidade real, medido em MPa e \bar{x} , s (MPa) e CV (%), representam, respectivamente, a média aritmética, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 2 – Valores médios de E_a para seis corpos-de-prova.

l/h	26	22	18	14	10	6
E_a	15405	15008	13229	11647	9392	4968
	15565	14696	13444	11356	9377	4882
	15373	15141	13640	11724	9290	4850
	15284	14964	13760	11522	9364	4860
	15484	14830	13597	11663	9238	4868
	15471	14981	13547	11612	9381	4850
\bar{x}	15431	14937	13536	11587	9340	4880
S	98	154	183	131	62	45
CV	0,0063	0,0103	0,0136	0,0113	0,0066	0,0092

Fonte: ROCCO,1983.

Para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal (E), Rocco (1983), utilizou a equação 3, que relaciona módulo de elasticidade longitudinal e a flecha, encontrada no ensaio de flexão.

$$E = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot v \cdot I} \quad (3)$$

Onde:

E = módulo de elasticidade (MPa);

P = força aplicada no ensaio (MPa);

v = flecha (mm);

I = momento de inércia (mm⁴).

Os valores do módulo de elasticidade longitudinal e resistência para a madeira verde de *Pinus elliottii* obtidos pelo IPT (1989), para o ensaio de flexão estática conduzido de acordo com as recomendações da NBR 6230/85 (ABNT MB26/53) são iguais a 6463 MPa e 48 MPa, respectivamente. Para a madeira de mesma espécie, a 15% de umidade, o valor de resistência nessa solicitação é de 69,9 MPa. Com a utilização da equação de correção da resistência à 12% de umidade, indicada pela NBR 7190/1997, obtém-se o valor equivalente a 76,19 MPa.

Esta correção se faz necessária pois não se pode comparar resultados com teores de umidade diferentes entre si.

Morales (2002) obteve os valores médios, para um vão de 21h e de acordo com o documento normativo NBR 7190/1997, de módulo de elasticidade longitudinal na flexão estática respectivamente igual a 9146,45, 10830,58 e 10994,70 para as espécies de *Pinus caribaea*, *Pinus elliottii* e *Pinus hondurensis*, apresentados na Tabela 3. São apresentados, também, os valores médios e desvios padrões (em MPa) e o coeficiente de variação (%).

Tabela 3 – Valores de E para espécies de Pinus.

	<i>Pinus caribaea</i>	<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus hondurensis</i>
	8340	11799	10816
	7834	10695	11995
	8171	10343	10051
	8138	10427	12931
	9448	11399	-
E (MPa)	11641	10370	10524
	8686	10155	10961
	-	10277	10239
	9802	11328	10568
	10262	8620	10866
	9143	12006	-
	9146	12548	10996
\bar{x}	9146,45	10830,58	10994,70
S	1119,88	1049,68	860,54
CV	0,1224	0,0969	0,0783

Fonte: MORALES (2002).

Com os resultados de E_a (%), em relação a E de vão de 21h, Rocco (1983), agrupou os resultados médios das cargas radial e tangencial, obtidos para a Peroba Rosa, o Eucalipto *Tereticornis* e os resultados médios da carga em direção qualquer para o Jatobá, apresentou o gráfico presente na Figura 4.

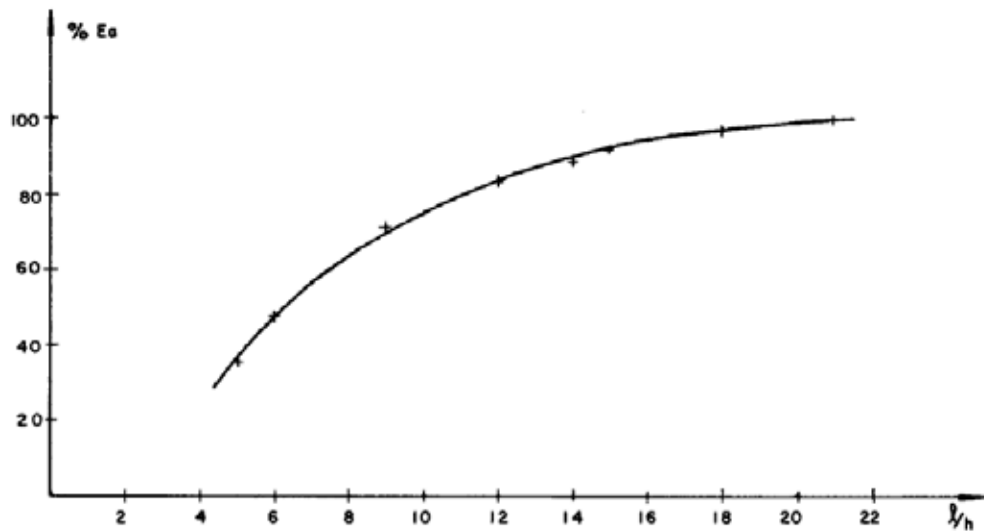


Figura 4 – Gráfico E_a (%) x l/h com cargas em ângulos quaisquer em relação aos anéis de crescimento. Fonte: ROCCO, 1983.

Em seu trabalho, Rocco (1983) também determinou o valor do módulo de elasticidade transversal (G) de algumas espécies de folhosas. A Tabela 4 apresenta as médias de G para a carga aplicada tangencialmente e radialmente, onde G_t e G_r , significam, respectivamente, módulo de elasticidade transversal com carga aplicada na direção tangencial e na radial.

Tabela 4 – Valores de G para carga aplicada tangencialmente e radialmente.

Espécie	Peroba Rosa		Eucalipto Tereticornis		Jatobá
	G_r	G_t	G_r	G_t	
\bar{x}	243	238	341	378	457
S	55	48	78	62	100
CV	0,224	0,202	0,229	0,164	0,219

Fonte: ROCCO, 1983.

O módulo de elasticidade transversal da madeira, Rocco (1983), foi determinado a partir do desenvolvimento da equação 4. Este desenvolvimento é demonstrado a seguir:

$$v = \frac{Pl^3}{48EI} + \frac{3Pl}{10SG} \quad (4)$$

Onde:

v = flecha (mm);

P = força aplicada (MPa);

E = módulo de elasticidade (MPa);

S = área da peça (mm²);

G = módulo de elasticidade transversal (MPa);

l = vão (mm);

I = momento de inércia (mm⁴).

$$v = \frac{10Pl^3SG + 144EIPl}{480EISG}$$

$$480EISGv = 10Pl^3SG + 144EIPl$$

$$480EISGv - 10Pl^3SG = 144EIPl$$

$$G(480EISv - 10Pl^3S) = 144EIPl$$

$$G = \frac{144EIPl}{480EISv - 10Pl^3S}$$

Substituindo $l = 14h$ na última equação obtém-se:

$$G = \frac{144 \cdot 14EIPh}{S(480EIv - 10 \cdot 14^3h^3P)}$$

$$G = \frac{2016EIPh}{S(480EIv - 27440Ph^3)}$$

Dividindo por 16, obtém-se a Equação 5:

$$G = \frac{126EIPh}{S(30EIv - 1715Ph^3)}$$

Onde:

v = flecha (mm);

P = força aplicada (MPa);

E = módulo de elasticidade (MPa);

S = área da peça (mm²);

G = módulo de elasticidade transversal (MPa);

h = altura do corpo de prova (mm);

I = momento de inércia (mm⁴).

Para as espécies estudadas, Jatobá, Eucalipto tereticornis e Peroba rosa, o valor de G é da ordem de $E/30$ a $E/40$. Porém, segundo a NBR 7190/1997, o valor de G é da ordem de $E/20$, para madeira de qualquer espécie.

Zangiácomo (2007), concluiu no seu trabalho que a relação $G = E/20$ não é um bom estimador para o módulo de elasticidade transversal para peças estruturais roliças das espécies *Pinus elliottii*, *Pinus caribaea* var. *caribaea* e *Eucalyptus citriodora*, que hoje é conhecida como *Corimbia citriodora*, estudadas.

3.4 Documentos Normativos

Estão apresentados a seguir os documentos normativos utilizados para a análise do tamanho do vão livre e principais recomendações do ensaio de flexão estática, nacionais e internacionais.

3.4.1 Nacionais

3.4.1.1 ABNT – NBR 7190

As dimensões nominais dos corpos-de-prova devem ser: $b = 5$ cm, $h = 5$ cm e $c = 115$ cm, aonde o vão livre (l) entre os apoios é equivalente a 21 vezes a altura, representadas pela Figura 5.

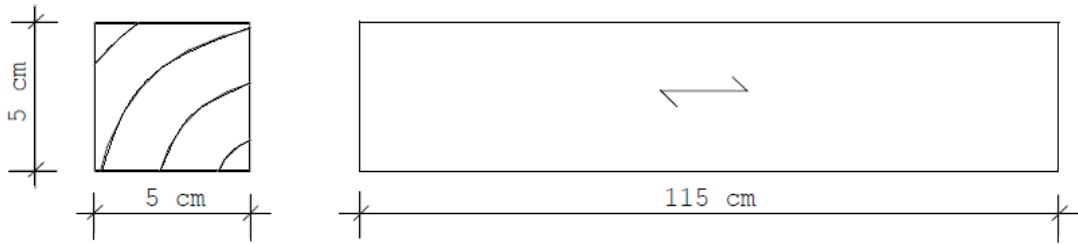


Figura 5 – Corpo de prova para ensaio de flexão. Fonte: ABNT-NBR 7190/1997, Anexo B.

A resistência convencional (f_m) em Mpa é dada pela expressão 6:

$$f_m = \frac{M}{W} \quad (6)$$

Onde:

M = máximo momento aplicado (N/m);

W = modulo de resistência elástico da seção transversal (m^3).

que é equivalente a

$$f_m = \frac{3 \cdot P \cdot I}{2 \cdot b \cdot h^3} \quad (7)$$

Onde:

f_m = resistência da madeira à flexão (MPa);

P = força aplicada (MPa);

I = momento de inércia (mm^4);

b = largura do corpo de prova (mm);

h = altura do corpo de prova (mm).

Deve-se realizar o carregamento de um corpo de prova de referência e leva-lo à ruptura, para se estimar a resistência da amostra ($f_{m,est}$). Em seguida, nos demais corpos-de-prova, são realizados dois ciclos de carregamento prévios e um ciclo de carregamento final, de acordo com o apresentado no diagrama de carregamento de Figura 6.

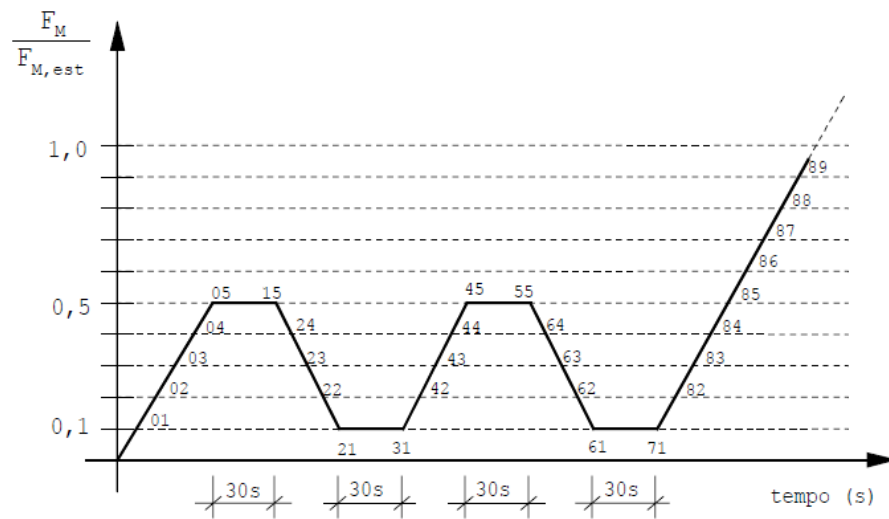


Figura 6- Diagrama de carregamento para determinação da rigidez à flexão estática.
Fonte: ABNT-NBR 7190/1997, Anexo B.

A rigidez da madeira à flexão é caracterizada pelo módulo de elasticidade determinado no trecho linear do diagrama força x deslocamento, entre os pontos 71 e 85 da Figura 6, como indica a Figura 7.

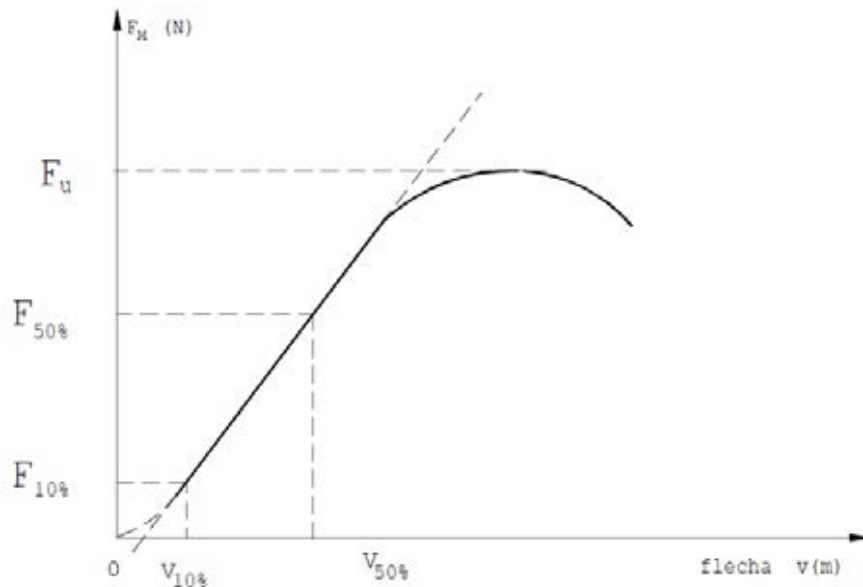


Figura 7 – Diagrama força aplicada x flecha na flexão. Fonte: ABNT-NBR 7190/1997, Anexo B.

Para esta finalidade, o módulo de elasticidade (E_M) em MPa deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva força aplicada x flecha no meio

do vão, definida pelos pontos $(F_{10\%}; V_{10\%})$ e $(F_{50\%}; V_{50\%})$, correspondentes respectivamente a 10% e 50% da força máxima, determinada no ensaio, sendo dada pela equação 8:

$$E_M = \frac{(F_{50\%} - F_{10\%}) \cdot l^3}{(V_{50\%} - V_{10\%}) \cdot 4 \cdot b \cdot h^3} \quad (8)$$

Onde:

E_M = módulo de elasticidade (MPa);

$F_{10\%}$ = carga correspondente a 10% da carga estimada (MPa);

$F_{50\%}$ = carga correspondente a 50% da carga estimada (MPa);

$V_{10\%}$ = deslocamento no meio do vão correspondente a 10% da carga máxima estimada (mm);

$V_{50\%}$ = deslocamento no meio do vão correspondente a 50% da carga máxima estimada (mm);

b = largura do corpo de prova (mm);

l = vão (mm);

h = altura do corpo de prova (mm).

3.4.1.2 ABNT – NBR 6230

Segundo a ABNT-NBR 6230 (1940), as dimensões nominais dos corpos de prova deveriam ser $b = 2$ cm, $h = 2$ cm e $c = 30$ cm. Embora não seja mais utilizada, foi utilizada no presente trabalho à título de comparação.

O corpo de prova é biapoiado e os apoios de aço teriam forma cilíndrica com raio igual a 1,5 cm. Aplicar-se-ia a força tangencialmente aos anéis de crescimento por um cutelo central, com o mesmo formato dos apoios. A distância entre os apoios seria de 24 cm, ou seja, $l = 12h$ e a velocidade da aplicação da força tal que a ruptura do corpo de prova ocorra em 2 minutos.

A resistência específica (σ_E) kgf/cm² seria calculada pela expressão 9:

$$\sigma_E = \frac{M}{W} \quad (9)$$

Onde:

σ_E = resistência da madeira à flexão (MPa);

M = máximo momento aplicado (N/m);

W = módulo de resistência elástica da seção transversal (m³).

Ou calculada pela expressão 10:

$$\sigma_E = \frac{3 \cdot P_R \cdot l}{2 \cdot b^3} \quad (10)$$

Onde:

σ_E = resistência da madeira à flexão (MPa);

b = largura do corpo de prova (mm);

l = vão (mm);

P_R = força aplicada (MPa).

O módulo de elasticidade (E_w) em kgf/cm² seria determinado pelo ensaio feito com os corpos de prova em dimensões $b = 6$ cm, $h = 6$ cm e $c = 100$ cm. Neste caso o vão livre (l) entre os apoios deveria ser de 84 cm, o raio do cutelo central igual a 85 cm e E_w calculado através da expressão 11:

$$E_w = \frac{P_l \cdot l^3}{4 \cdot f_c \cdot b \cdot h^3} \quad (11)$$

Onde:

E_w = módulo de elasticidade (MPa);

P_l = força aplicada (MPa);

l = vão (mm);

f_c = flecha (mm);

b = largura do corpo de prova (mm);

h = altura do corpo de prova (mm).

3.4.2 Internacionais

3.4.2.1 AFNOR B 51-016

Segundo a AFNOR B 51-016 (1987), as dimensões nominais dos corpos-de-prova devem ser $b = 20$ mm, $h = 20$ mm e $c = 360$ mm. Na realização do ensaio, o corpo de prova deve ser biapoado, com a distância de 320 mm entre os apoios, ou seja, $l = 16h$ e os dois aplicadores de força devem ser distanciados de $d = 160$ mm. Os apoios e os aplicadores de força têm o formato cilíndrico com diâmetro nominal de 30 mm.

Efetua-se um ensaio prévio para verificar se, no intervalo considerado, a curva força x deslocamento é linear. Se isto não ocorrer, modificam-se as forças mínima e máxima com a finalidade de efetuar as medidas na fase elástica.

Colocam-se os dois aplicadores de força em contato com a face superior do corpo de prova e carrega-se até $P_1 = 600$ N em 30 ± 10 s, à velocidade constante de aplicação de força. Descarrega-se, nas mesmas condições, até $P_2 = 200$ N. Repetem-se duas vezes esses ciclos de carregamento e descarregamento.

Mede-se o deslocamento em menos de 10 s quando a carga vale 200 N e quando vale 600 N. medem-se os deslocamentos máximo f_1 e mínimo f_2 durante os três ciclos de carregamento e descarregamento sucessivos.

O valor do módulo de elasticidade (E_M) em Mpa é dado pela expressão 12:

$$E_M = \frac{3 \cdot P_M \cdot (l - d) \cdot m^3}{8 \cdot b \cdot h^3 \cdot f} \quad (12)$$

Onde:

E_M = módulo de elasticidade (MPa);

P_M = força aplicada (MPa);

l = vão (mm);

d = distância entre aplicadores de força (mm);

m = distância entre eixos dos cilindros do suporte, (mm);

b = largura do corpo de prova (mm);

h = altura do corpo de prova (mm);

f = flecha (mm).

3.4.2.2 ASTM D-143

Segundo a ASTM D-143 (1982), as dimensões nominais dos corpos-de-prova devem ser $b = 5$ cm, $h = 5$ cm e $c = 76$ cm. Estes são biapoiados, sendo que a distância l entre os apoios deve ser de 70 cm, ou seja, $l = 14h$. A velocidade de carregamento deve ser tal que produza deslocamento de 2,5 mm/min. Em ao menos um terço dos ensaios, a curva pode ser continuada até 15 cm de deflexão, ou até que o corpo de prova falhe por suportar uma força de magnitude igual ou superior a 90 kgf.

3.4.2.3 COPANT R-555

Segundo a COPANT R-555 (1973), as dimensões nominais do corpo de prova devem ser $b = 5$ cm, $h = 5$ cm e $c = 15h$.

O ensaio é realizado com o corpo de prova biapoiado recebendo uma força aplicada com velocidade constante que proporcione deslocamento de 2,5 mm/min no ponto médio do vão. A distância l entre os apoios é igual a 14 vezes a altura.

Através de relógios comparadores, medem-se os deslocamentos (f_c) produzidos no ponto médio do corpo de prova para forças progressivas, com intervalos de tempo convenientemente escolhidos, de modo que com as leituras registradas possa se efetuar a determinação do limite de proporcionalidade (P_l) no gráfico força x deslocamento. Anota-se o valor da força máxima (P_R) obtida no ensaio.

No gráfico força x deslocamento, P_l é o ponto extremo da parte retilínea, correspondendo à força no limite de proporcionalidade.

Calculam-se a tensão no limite de proporcionalidade (ELP_f) em kgf/cm² e a tensão máxima (EM_f) em kgf/cm², dadas respectivamente pelas expressões 13 e 14:

$$ELP_f = \frac{3 \cdot P_l \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (13)$$

Onde:

ELP_f = limite de proporcionalidade (kgf/cm²);

P_l = força aplicada (kgf);

b = largura do corpo de prova (cm);

h = altura do corpo de prova (cm).

e

$$EM_f = \frac{3 \cdot P_R \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^3} \quad (14)$$

Onde:

EM_f = tensão máxima (kgf/cm²);

P_R = força aplicada (kgf/cm²);

b = largura do corpo de prova (cm);

h = altura do corpo de prova (cm).

Para se calcular o módulo de elasticidade (MOE_f) em kgf/cm² utiliza-se a expressão 15:

$$MOE_f = \frac{P_l \cdot l^3}{4 \cdot f_c \cdot b \cdot h^3} \quad (15)$$

Onde:

MOE_f = módulo de elasticidade (kgf/cm²);

P_l = força aplicada (kgf);

l = vão (cm);

f_c = flecha (cm);

b = largura do corpo de prova (cm);

h = altura do corpo de prova (cm).

3.4.2.4 ISO 3349 e 3133

Segundo a ISO 3349 e 3133 (1975), as dimensões nominais dos corpos-de-prova devem ser $b = 20$ mm, $h = 20$ mm e $c = 300$ a 380 mm. No ensaio, o corpo de prova deve ser biapoiado e a força deve ser introduzida por dois aplicadores com velocidade constante, de modo que ocorra a ruptura entre 1,5 a 2,0 min. A distância l entre os apoios é de 240 a 320 mm, ou seja, l vale $12h$ a $16h$, e entre os pontos de aplicação das forças igual a $1/3$ ou $1/2$ da distância entre os apoios. O raio de curvatura dos suportes é de 30 mm.

Aplica-se a força com velocidade constante até que a superfície do corpo de prova atinja a tensão de 18 MPa em 30 segundo. Quando se atinge 18 MPa, a força aplicada é reduzida até se alcançar 5 MPa, então aumenta-se a força a 18 MPa e diminui-se novamente a 5 MPa. A partir deste ponto as forças são aplicadas com incrementos iguais no tempo e, nos primeiros quatro incrementos, são registrados os respectivos deslocamentos.

A resistência convencional última (σ_{bW}) em MPa e a $W\%$ de umidade, é dada pela expressão 16:

$$\sigma_{bW} = \frac{3 \cdot P_R \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (16)$$

Onde:

σ_{bW} = resistência convencional última (MPa);

P_R = força aplicada (MPa);

l = vão (mm);

b = largura do corpo de prova (mm);

h = altura do corpo de prova (mm).

O módulo de elasticidade (E_W) em 0,1 GPa é dado pelas expressões 17 e 18:

a) Para distancia entre os pontos de aplicação de força igual a $1/3$ do vão:

$$E_W = \frac{P_W \cdot l^3}{36 \cdot b \cdot h^3 \cdot f_W} \quad (17)$$

Onde:

E_W = módulo de elasticidade (GPa);

P_W = diferença entre os limites superior e inferior de força na fase elástica (MPa);

l = vão (mm);

b = largura do corpo de prova (mm);

h = altura do corpo de prova (mm);

f_W = deslocamento correspondente à diferença de forças P_W (MPa).

b) Para distância entre os pontos de aplicação das forças de $\frac{1}{2}$ do vão:

$$E_W = \frac{P_W \cdot l^3}{64 \cdot b \cdot h^3 \cdot f_W} \quad (18)$$

Onde:

E_W = módulo de elasticidade (GPa);

P_W = diferença entre os limites superior e inferior de força na fase elástica (MPa);

l = vão (mm);

b = largura do corpo de prova (mm);

h = altura do corpo de prova (mm);

f_W = deslocamento correspondente à diferença de forças P_W (MPa).

3.4.2.5 CEN 408

Segundo a CEN 408 (1995), os corpos-de-prova devem ter comprimento mínimo (c) de dezenove vezes a altura (h) da seção transversal, medidos em mm.

A força deve ser aplicada simetricamente em dois pontos sobre o corpo de prova, cujo vão livre mínimo é de 18 vezes h , conforme indicado na Figura 8. A aplicação deve ter precisão de 1% e a velocidade constante, até que se atinja a força máxima dentro de 300 ± 120 s.

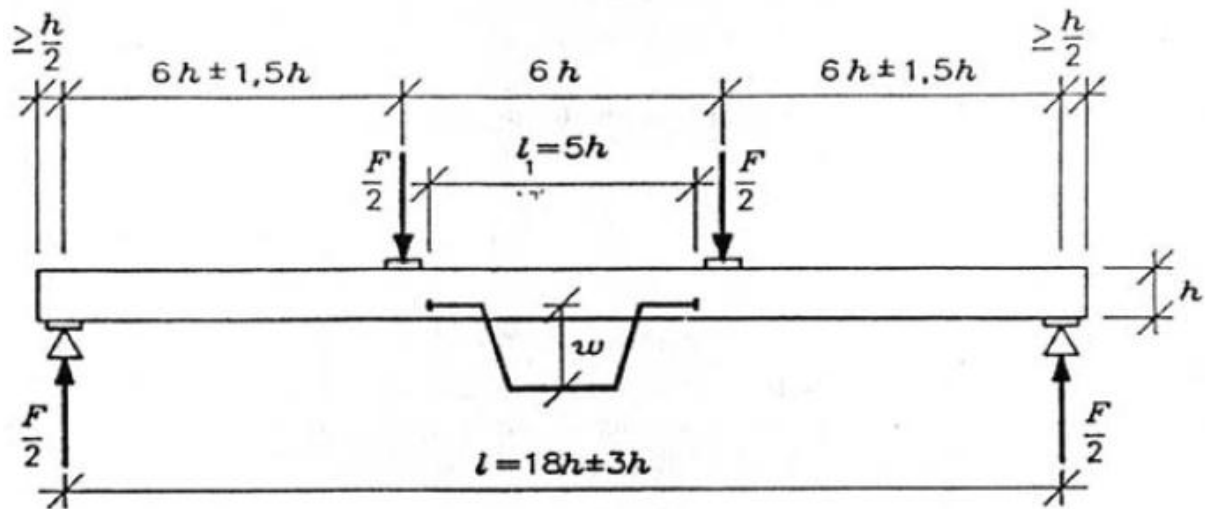


Figura 8 – Arranjo do ensaio de flexão estática para a determinação do valor do módulo de elasticidade. Fonte: CEN 408.

A resistência convencional à flexão (f_M) em MPa é dada pela expressão 19:

$$f_M = \frac{a \cdot F_{m\acute{a}x}}{2 \cdot W} \quad (19)$$

Onde:

f_M = resistência convencional à flexão estática (MPa);

a = espessura da seção transversal do corpo de prova (mm);

$F_{m\acute{a}x}$ = força máxima (MPa);

W = módulo de resistência (MPa).

Estas mesmas recomendações devem ser seguidas para o cálculo do módulo de elasticidade (E_M), dado em MPa, desde que a velocidade de carregamento não seja maior que 0,003h mm/s. as deformações devem ser medidas no centro do corpo de prova, num trecho de comprimento igual a e vezes a dimensão de h. o seu valor é dado pela expressão 20:

$$E_M = \frac{a \cdot d^2 \cdot (F_2 - F_1)}{16 \cdot l \cdot (w_2 - w_1)} \quad (20)$$

Onde:

E_M = módulo de elasticidade (MPa);

a = espessura da seção transversal do corpo de prova (mm);

d = distância entre aplicadores de força (mm);

F_2 = força no final da parte linear da curva força x deformação (MPa);

F_1 = força no início da parte linear da curva força x deformação (MPa);

I = momento de inércia (mm⁴);

w_2 = deformação correspondente à F_2 (mm);

w_1 = deformação correspondente à F_1 (mm).

3.4.3 Considerações finais sobre a revisão bibliográfica

Existem poucas pesquisas sobre módulo de elasticidade transversal, considerando sua relação com o módulo de elasticidade longitudinal, quer seja a espécie, em especial para Pinus.

Outro fato que se observa é que não há um consenso entre os principais documentos normativos consultados sobre o tamanho de vão livre adotado para os corpos de prova utilizados no estudo do módulo de elasticidade longitudinal ou sobre a relação que há entre os módulos de elasticidade longitudinal e transversal.

Analisando todos os documentos normativos apresentados anteriormente, foi possível verificar que somente o documento normativo NBR 7190/1997 utiliza, para o ensaio de flexão estática, um vão de 21h, sendo que todos os outros documentos analisados apresentaram vãos com dimensões inferiores á 21h.

4. MATERIAIS E MÉTODO

Foram utilizadas doze árvores da espécie *Pinus elliottii* var. *elliottii* e treze árvores da espécie *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus cariabeae hondurensis* (híbrido), ambas doadas pela empresa Resisul Agroflorestal LTDA.

As árvores de *Pinus elliottii* var. *elliottii* possuíam idade de dezenove anos e foram retiradas da quadra 44 da Fazenda Fortaleza LTDA, localizada no município de Paranapanema, Estado de São Paulo, com um espaçamento de plantio de 4,0m x 3,0m. As árvores da espécie *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus cariabeae hondurensis* possuíam idade de doze anos e foram retiradas da quadra 40 da mesma Fazenda com o mesmo espaçamento.

Primeiramente os perfis dos pranchões foram pintados de amarelo ou branco, referindo-se, respectivamente às espécies *Pinus elliottii* var. *elliottii* e *Pinus elliottii* var. *Pinus cariabeae hondurensis*, que serão denotadas ao longo do texto por PEE e PEH.

Inicialmente foram cortadas toras de 2,40m de comprimento e diferentes diâmetros que foram beneficiadas na Serraria São José, situada na Rua Irmã Ernestina, 1095 – Distrito Industrial Itapeva – SP. Foram retiradas as costaneiras e nos blocos daí provenientes, realizou-se um corte central para facilitar a retirada dos corpos-de-prova, como mostra a Figura 9.



Figura 9- Corte e transporte dos blocos. a) Corte da tora para confecção do bloco; c) Movimentação dos blocos com auxílio da grua.

Os pranchões foram levados à UNESP – Campus Experimental de Itapeva, onde receberam um tratamento com *Osmotox Plus*, preservativo fungicida

de uso exclusivamente industrial, indicado para tratamento profilático de toras e madeiras serradas verdes, para prevenir o ataque de fungos manchadores e emboloradores antes de seus desdobros. Todo o restante do desenvolvimento do trabalho foi conduzido no mesmo Campus, Figura 10.



Figura 10- Tratamento dos pranchões: a) Tanque com *Osmotox Plus*; b) Pranchões recebendo tratamento.

Em seguida, os pranchões foram tabicados e condicionados em local coberto onde não houvesse muito contato com a chuva, para diminuir a probabilidade de ataque de fungos antes de seus beneficiamentos, conforme a Figura 11.



Figura 11 – Acondicionamento dos pranchões: a) Pranchões em local coberto; b) Pilha dos pranchões tabicados.

Foram realizadas medições da altura e largura dos pranchões, representados, respectivamente por A e B, como mostra a Figura 12, para uma melhor retirada dos corpos-de-prova de flexão estática.

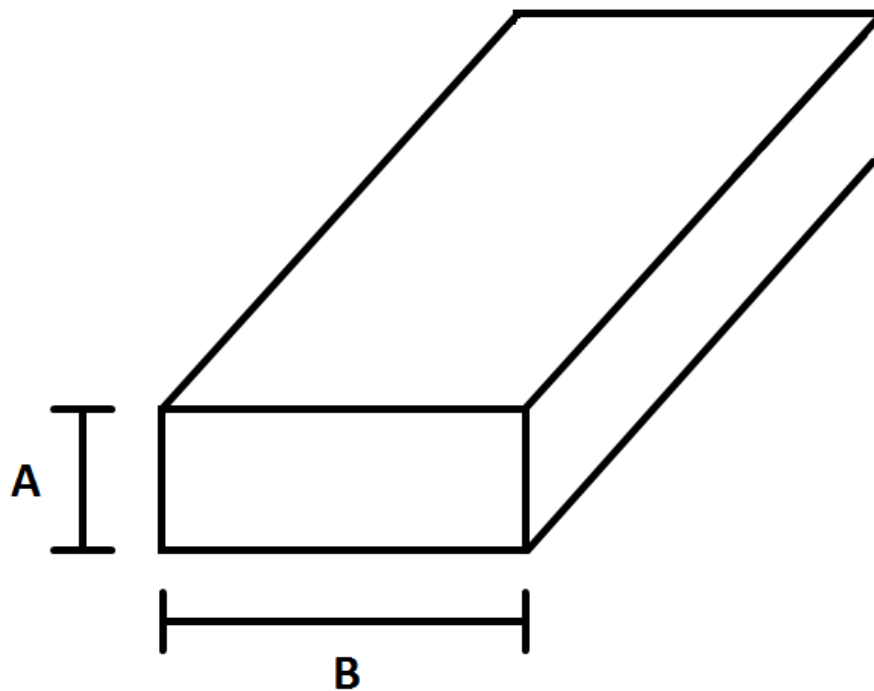


Figura 12- Desenho esquemático dos pranchões.

Na tabela 5, estão apresentados os dados as alturas e larguras dos pranchões de acordo com a espécie a que pertenciam.

Tabela 5- Dimensões dos pranchões.

N°	PEE		PEH	
	A (cm)	B (cm)	A (cm)	B (cm)
1	9,5	18,2	8,6	15,6
2	8	16,1	8,5	15,2
3	8,7	18	7,5	15,2
4	9,6	18,7	8,2	15,9
5	8,2	16,1	7,1	15,7
6	8,3	16,3	8,7	15,9
7	9	19,4	8	16
8	8,8	16,1	7,2	15,9
9	8,5	16,1	7,6	16,4
10	7	15,8	7,7	16,1
11	8,8	19,1	8,9	15,8
12	9,4	18,5	8,2	15,3
13	7	16,3	7,5	16
14	7,3	16,1	8,3	16,1
15	9,5	19	8,8	16,5
16	9,7	19,3	7,8	16,2
17	7,7	16,2	7,5	16,2
18	7,4	16,3	5,9	16,3
19	9,1	19	8,1	15,9
20	8	16,1	8,1	15,9
21	7,2	16,1	7,5	16
22	9,6	19,3	6,8	15,4
23	7,9	15,9	8,3	16
24	8,6	15,9	7,2	15,5
25			7,3	16,1
26			8,5	15,5

Os pranchões foram passados na reserra para padronizar a espessura em 55 mm, sendo essa face passada na desempenadeira e, em prosseguimento, as duas faces foram passadas na plaina até serem obtidas a espessura e altura dos corpos-de-prova de flexão estática iguais a 50 mm. A Figura 13 mostra os equipamentos utilizados nesse processo de usinagem.



Figura 13 – Máquinas para beneficiamento da madeira. a) Resserra ; b) Desempenadeira ; c)Desengrossadeira.

Na serra esquadrejadeira (Figura 14) foram feitos os cortes com a medida de 1,25 m de comprimento para o término da confecção dos corpos-de-prova de flexão estática, quando foi feita uma seleção visual para retirá-los das peças com menor quantidade de nós.



Figura 14 – Serra esquadrejadeira e refiladeira.

A seção transversal dos mesmos foi obtida como prescrito pelo NBR 7190/1997, não se fazendo distinção entre os planos tangencial e radial, devido a presença de nós, medula e bolsa de resina contidos nas peças, e por não se fazer parte dos objetivos do trabalho a comparação de módulos de elasticidade longitudinais nessas duas direções.

No total foram cortados vinte e oito corpos-de-prova, onde quatro desses eram peças gêmeas para a realização de estimativas da resistência à flexão estática e posteriores ensaios para cálculo dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal, sendo utilizados 12 corpos de prova de cada espécie. Esse número de corpos de prova foi retirado como recomendado no documento normativo NBR 7190/1997, para a caracterização de uma espécie não conhecida (Figura 15).



Figura 15 – Corpos-de-prova.

Antes dos ensaios, a umidade dos corpos-de-prova foi controlada, em sala climatizada, até que todos atingissem uma umidade de 12% para melhor controle e confiança nos resultados finais, como adotado pela NBR 7190/1997. Os ensaios de flexão estática foram executados em uma máquina universal EMIC, modelo DL, com capacidade máxima de 300.000 N (Figura 16).



Figura 16 – EMIC, modelo DL com capacidade de 30 toneladas.

Para facilitar a sequência dos ensaios, foram realizados todos os testes para os corpos-de-prova para um mesmo vão, iniciando-se os ensaios com o vão de 23 vezes a altura, e seguindo-se a sequência de vãos pela altura iguais a 21, 18, 15, 14, 12, 9, 6 e 5 respectivamente.

Com o vão de 23 vezes a altura foi realizado o teste com ciclos de carregamento não havendo necessidade de realizá-los para os outros vãos, pois as fibras já estavam acomodadas, conforme o documento normativo da NBR 7190/1997. Assim, o tempo de ensaio foi reduzido para os outros vãos. Por último, foram ensaiados todos os corpos-de-prova até sua ruptura, para obtenção da força máxima de cada amostra.

Os resultados dos ensaios foram editados na planilha de cálculo e a partir deles, foram plotados gráficos, feitas médias, desvios padrões, coeficiente de variação e encontrado os valores dos módulos de elasticidade transversal. Para a determinação do G , foi realizado a dedução da equação, para o vão de 14h, a partir da equação citada na revisão bibliográfica, que utilizada o mesmo vão.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 6 estão apresentados os valores encontrados para os ensaios realizados para as espécies estudadas. Com estes valores, foi possível fazer uma comparação entre o *Pinus elliottii* var. *elliottii* e *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus cariabeae hondurensis* (híbrido), onde são colocados os valores de módulos de elasticidade longitudinal, quando E para l = 21h, e transversal, quando G para l = 14h, bem como de resistência na flexão estática, incluindo valores médios e desvios padrões em MPa, e o coeficiente de variação em %.

Tabela 6: Valores dos ensaios realizados para comparação.

	PEE	PEH	PEE	PEH	PEE	PEH
	E		G		f _m	
	4567	9006	410	306	24,14	25,57
	5223	5011	371	331	24,26	24,23
	4258	4763	-816	353	23,55	24,57
	7202	6223	860	329	24,39	24,53
	4909	10389	1868	331	24,64	24,98
	4974	7972	670	226	23,97	25,57
	7803	4687	302	328	24,76	24,21
	6029	4327	335	480	24,85	24,22
	4125	5615	419	432	23,77	24,48
	10326	4140	426	222	25,04	24,81
	4544	7278	276	254	24,1	25,01
	5972	7472	305	242	24,75	25,09
\bar{x}	5828	6407	452	320	24,35	24,77
S	1825	2016	597	79	0,46	0,48
CV	31	31	132	25	2	2

Pelos dados mostrados na Tabela 6, pode-se observar que os valores de módulos de elasticidade longitudinal e os valores de resistência na flexão estática são muito próximos para as duas espécies estudadas. Já para as duas espécies estudadas, os valores de módulos de elasticidade transversal, o mesmo não ocorre.

Observam-se, também, dois valores muito discrepantes, que aparentemente podem ser explicados por algum problema no ensaio, que são -816 e 1868 MPa, para a espécie *Pinus elliottii*, o que explica o alto valor de coeficiente de variação encontrado. Se esses valores forem desconsiderados, obtém-se G médio de 437 MPa, com desvio padrão de 186 MPa, o que torna o coeficiente de variação igual a 43%. Para o híbrido, os valores encontrados foram coerentes com os dados encontrados na literatura e apresentados na revisão bibliográfica.

Verifica-se, também, que os valores de módulo de elasticidade longitudinal obtidos para as duas espécies são iguais a praticamente a metade dos encontrados por Morales (2002), o que é explicado pela resistência dos lotes que também foi muito inferior à indicada pelo IPT (1989). Vale se ressaltar também que as madeiras utilizadas, de ambas espécies, apresentavam grande incidência de nós, o que pode elucidar a magnitude dos valores citados encontrados.

Isso mostra, que as duas espécies estudadas podem ser equiparadas com relação às suas propriedades mecânicas na flexão estática, apesar de procederem de árvores de diferentes idades, ou seja, como a madeira da espécie híbrida provém de árvores cerca de 7 anos mais jovens que da proveniente da de *Pinus elliottii*, entende-se que esta última está com propriedades inferiores para se aplicar em estruturas, conforme apresentado na revisão bibliográfica por Morales (2002) e pelo IPT (1989).

Os valores médios de módulo de elasticidade transversal foram cerca de 33% inferiores aos encontrados por Bodig; Jayne (1982) para espécies de coníferas com valores de módulos de elasticidade de 6000 MPa e próximos aos encontrados por Rocco (1983) para as espécies jatobá e eucalipto tereticornis.

A Figura 17 mostra as porcentagens de perda do módulo de elasticidade aparente pela variação do vão de 5.h a 23.h, para a espécie *Pinus elliottii*.

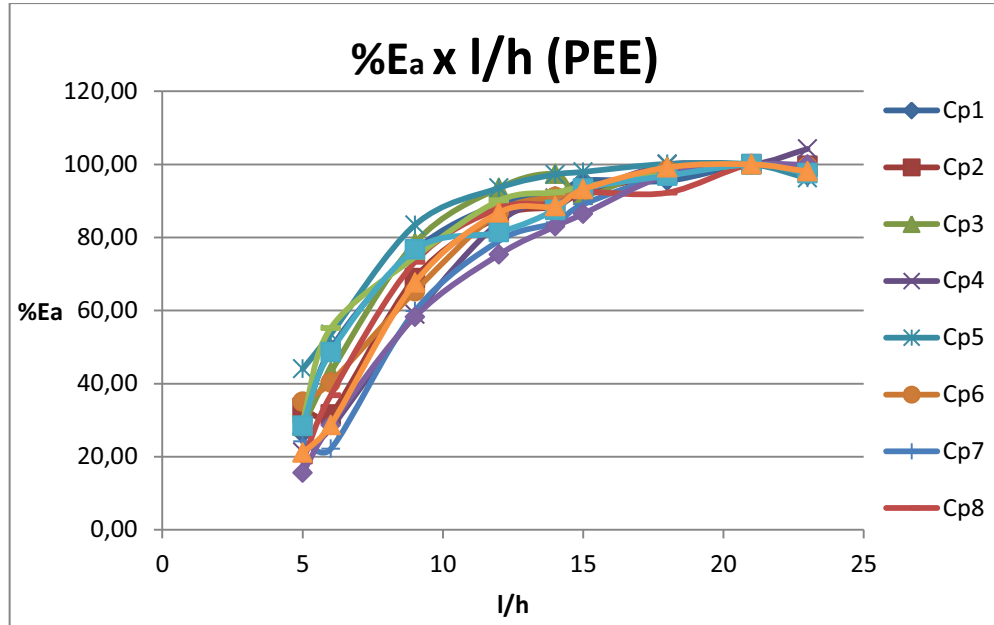


Figura 17 - Porcentagens de perda do módulo de elasticidade aparente pela variação do vão de 5h a 23h para a espécie *Pinus elliottii* var. *elliottii*.

A Figura 18 mostra as porcentagens de perda do módulo de elasticidade aparente pela variação do vão de 5.h a 23.h, para a espécie *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaeae hondurensis* (híbrido).

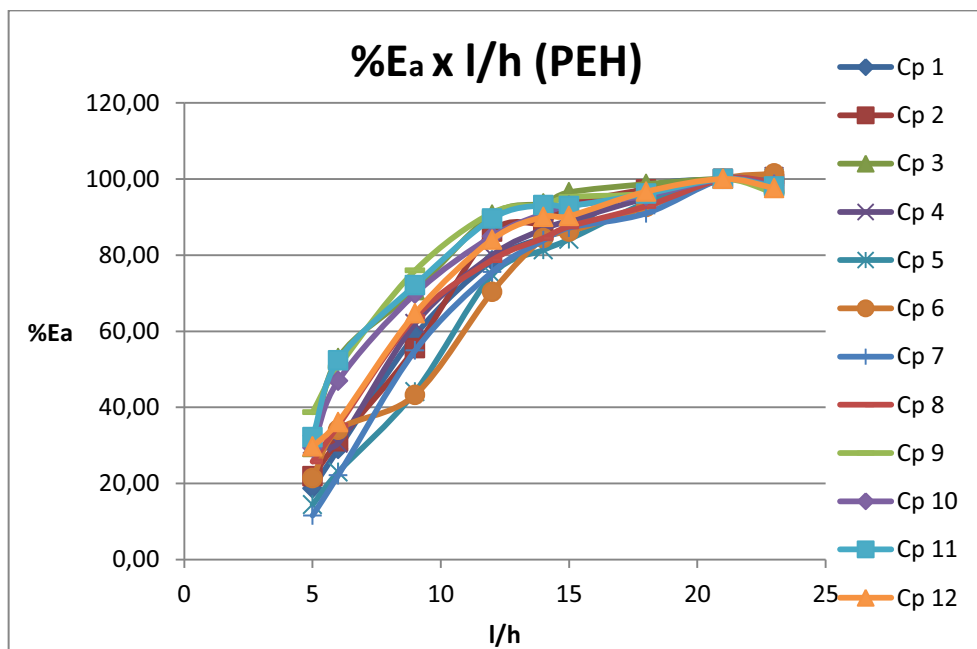


Figura 18 - Porcentagens de perda do módulo de elasticidade aparente pela variação do vão de 5h a 23h para a espécie *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaeae hondurensis* (híbrido).

Observa-se que a as linhas de tendência para todos os corpos de prova tiveram o mesmo comportamento não linear até próximo ao vão 21h e com uma variação sutil após esse ponto e após esse ponto, equivalente ao encontrado por Rocco (1983) com espécies de folhosas.

A Figura 19 apresenta, em valores médios, os valores de módulos de elasticidade pela variação do vão de 5h à 23h, para as duas espécies estudadas.

No mesmo observa-se que o comportamento das linhas de tendência para as duas espécies mostra o mesmo comportamento analisado nas Figuras 17 e 18. Porém, a partir do vão 12h, começa a haver uma ligeira prevalência da curva referente aos dados do híbrido, já que o valor médio do módulo de elasticidade longitudinal para esta espécie foi cerca de 600 MPa superior ao da outra.

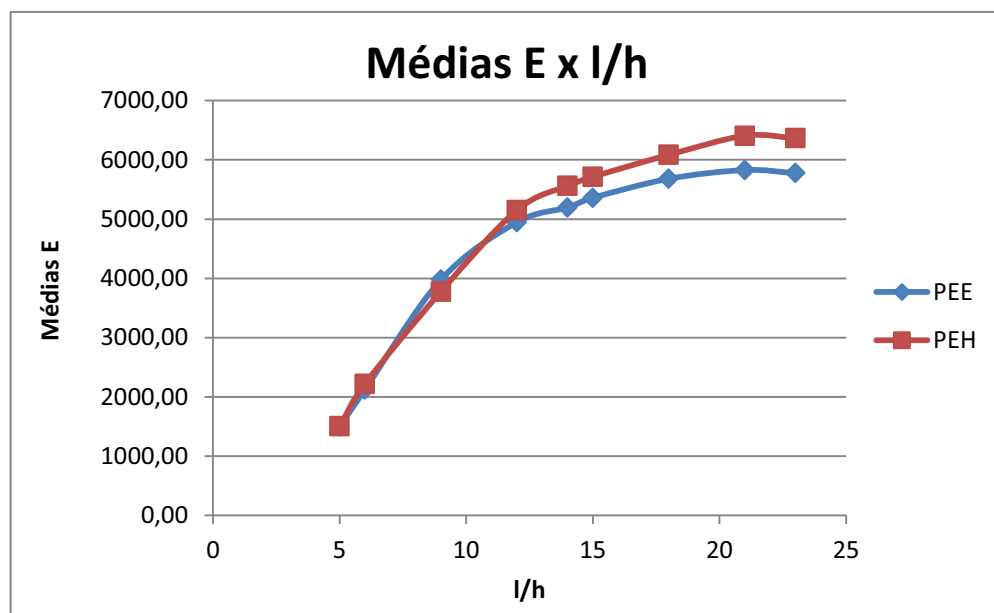


Figura 19 - Valores médios dos módulos de elasticidade pela variação do vão de 5.h a 23.h

A Figura 20 apresenta, em valores médios, as porcentagens de perda do módulo de elasticidade aparente pela variação do vão de 5.h a 23.h, para as duas espécies estudadas.

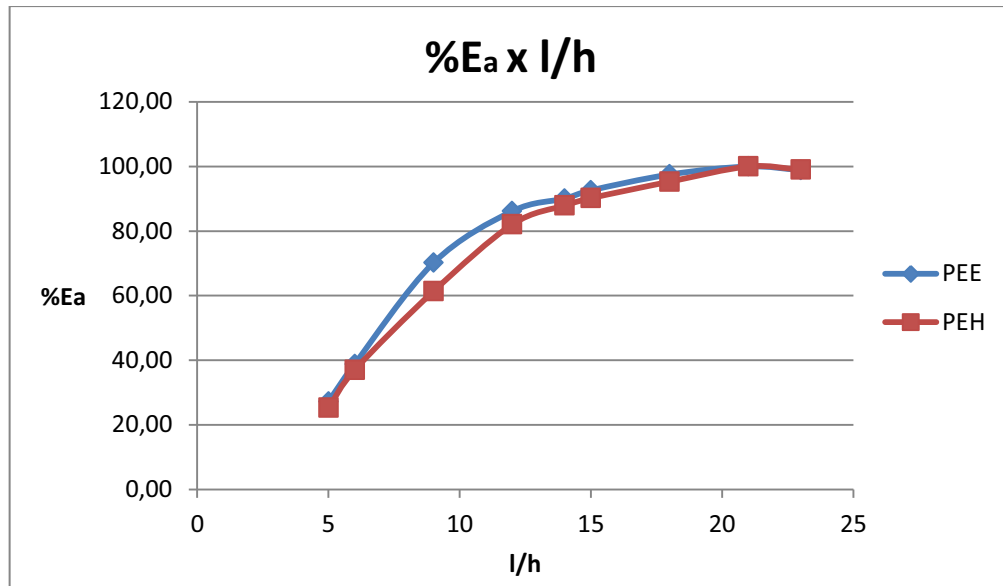


Figura 20 – Valores médios das porcentagens de perda do módulo de elasticidade aparente pela variação do vão.

Observa-se que o comportamento das linhas de tendência para as duas espécies se mostra o mesmo do já analisado na Figuras 17 e 18, mesmo com a pequena diferença entre a magnitude entre os valores de módulos de elasticidade apresentados pelas duas espécies.

Evidencia-se, então, que o módulo de elasticidade longitudinal real é obtido no ensaio de flexão com o vão maior ou igual a 21h para as espécies de coníferas estudadas neste trabalho, apesar de as mesmas terem apresentado rigidez e resistência inferiores as de outros autores.

Dos valores médios de módulos de elasticidade longitudinal e transversal apresentados na Tabela 6 para as espécies *Pinus elliottii* e híbrido *Pinus elliottii var. elliottii x Pinus cariabae hondurensis*, obtêm-se, respectivamente as relações $G = E/13$ e $G = E/20$.

A segunda relação está de acordo com a proposta pela NBR 7190/1997 e diferente para as demais literaturas citadas. Disto depreende-se que o método utilizado para este trabalho foi de acordo com a literatura e que alguma eventualidade aconteceu com as madeiras do lote da espécie *Pinus elliottii*, indicando-se a necessidade de novos trabalhos com essas espécies, inclusive devido a falta de consenso entre os dados fornecidos pelos trabalhos ou documentos normativos que abordam o assunto.

6. CONCLUSÃO

Com os resultados encontrados para os módulos de elasticidade longitudinal e transversal, a partir da realização dos ensaios de flexão estática, foi possível verificar que, mesmo o *Pinus elliottii* var. *elliottii* ser uma árvore mais velha, cerca de 7 anos a mais que o *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaeae hondurensis* (híbrido), suas propriedades apresentam qualidade inferior em relação ao híbrido para se aplicar em estruturas. Os valores de módulos de elasticidade longitudinal e de resistência na flexão estática são muito próximos para as duas espécies estudadas e diferenciadas para os módulos de elasticidade transversal.

Os gráficos plotados a partir das porcentagens de perda do módulo de elasticidade aparente em relação ao vão utilizado nos ensaios de flexão estática mostram que as linhas de tendência para todos os corpos de prova tiveram o mesmo comportamento não linear até próximo ao vão de 21h e com uma variação sutil após esse ponto, comprovando o uso de um vão mínimo de 21h como adotado pelo documento normativo NBR 7190/1997 para as espécies de coníferas estudadas.

Para a correlação $G=E/20$ adotada pelo documento normativo NBR 7190/1997, a espécie *Pinus elliottii* var. *elliottii* não apresentou um resultado coerente com o esperado, lembrando que para esta espécie algum problema ocorreu no ensaio pois apresentou dois resultados discrepantes. Já para a espécie *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaeae hondurensis* (híbrido), os resultados foram coerentes com essa relação, confirmando que o método de ensaio realizado foi de acordo com a literatura consultada.

Ressalta-se que, este estudo deve ser realizado novamente, pois o material estudado apresentava muitos nós e algum problema ocorreu na realização do ensaio, pois os módulos de elasticidade transversal do híbrido foram coerentes com o documento normativo, mas para o *Pinus elliottii* houve alguns resultados discrepantes.

Indica-se também a realização de novos estudos do módulo de elasticidade transversal em coníferas considerando-se os planos longitudinal-radial e longitudinal-tangencial que não foram diferenciados neste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-143 – Standard methods of testing small clear specimens of timber, Philadelphia, USA, p.12-16, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB 26 – Ensaio físicos e mecânicos de madeira, Rio de Janeiro, Brasil, p.8-12, 1940.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira – Anexo B, Rio de Janeiro, Brasil, p.50-58, 65-67, 1997.
- BALLARIN, A. W. Caracterização ELÁSTICA DA MADEIRA DE *Eucalyptus citriodora*. 2003. 15 f. Dissertação (Dissertação) - FCA/UNESP, Botucatu, 2003.
- BALLARIN, A. W.;PALMA,H.A.L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. Rev.Árvore, vol.27 no.3 Viçosa May/June 2003
- BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.. RESISTÊNCIA DOS MATERIAS. 3ª Edição São Paulo: Pearson Makron Books, 1995. 1255 p.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. (1982). Mechanics of Wood an wood composites. New York, Ed.
- COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. COPANT R 555 – Método de ensayo de flexión estática, Buenos Aires, Argentina, p.3-9, 1973.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. CEN EN 408 – Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties, Bruxelles, 19 p, 1995.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISSO 3349: Wood – Test methods – Determination of modulus of elasticity in static bending, Geneve, Switzerland, 1 ed.,p. 1-3, 1975.
- L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. AFNOR. B 51-016- Bois-Métrhodes d'essais – Essai de choc ou flexion statique, Paris, France, p.1-4, 1987.
- MORALES, E. A. M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira: proposta para simplificação de procedimentos metodológicos. 2002. 112 f. Tese (Mestrado) - Usp, São Carlos, 2002.

ROCCO LAHR, F. A. Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira. São Carlos, 1983. p.210. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SHIMIZU, J. Y., Pínus na Silvicultura Brasileira. Colombo - Pr, 2008. Disponível em: <http://livraria.sct.embrapa.br/liv_resumos/pdf/00083142.pdf>. Acesso em: 25 maio 2011.

STAMATO, G. C., 2008, Londrina - PR. Cuidados com a utilização de coníferas nas estruturas de madeira. Londrina: Indi Gráfica Editora Ltda, 2008.

ZANGIÁCOMO, A. L. Estudo de elementos estruturais roliços de madeira. 2007. 142 f. Tese (Título de Doutor) - Usp, São Carlos, 2007.