

INFLUÊNCIA DA UMIDADE NAS PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DA MADEIRA

Norman Barros Logsdon ¹ & Carlito Calil Junior ²

Resumo

A norma brasileira para o projeto de estruturas de madeira foi alterada, recentemente, abandonando o método determinista das Tensões Admissíveis e adotando o método probabilista dos Estados Limites. Seguindo tendência mundial, a atual norma brasileira, estabelece um teor de umidade de referência de 12%, para o qual devem ser reportados os resultados dos ensaios. Dificilmente se conseguirá condicionar a madeira, com um teor de umidade de exatamente 12%, para o ensaio, portanto será necessário corrigir os resultados do ensaio para este teor de umidade. A atual norma brasileira propõe expressões, para fazer esta correção nas propriedades de resistência e de rigidez da madeira, baseando-se em poucos resultados de ensaios. O objetivo deste trabalho é aferir as expressões propostas pela norma brasileira, sugerindo as alterações necessárias, bem como apresentar proposta para a correção da densidade aparente, não prevista na norma brasileira. Para garantir uma base experimental adequada, estudou-se a influência do teor de umidade sobre as propriedades de resistência à compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras (no plano radial-longitudinal), bem como sobre o módulo de elasticidade longitudinal e a densidade aparente, em sete diferentes espécies de madeira, correspondentes às sete classes de resistência adotadas pela atual norma brasileira. Conclui-se o trabalho apresentando uma proposta para correção das propriedades de resistência e rigidez ao teor de umidade de 12% e também uma proposta para a correção da densidade aparente.

Palavras-chave: madeira; teor de umidade; resistência; rigidez.

1 INTRODUÇÃO

Há muito tempo sabe-se que a resistência da madeira varia com seu teor de umidade. Com o aumento do teor de umidade da madeira observa-se uma diminuição em sua resistência, esta diminuição de resistência é mais sensível para baixos teores de umidade, e é praticamente desprezível para elevados teores de umidade.

Decorre deste fato, que para comparar a resistência de duas espécies, ou peças, a uma determinada solitação, é necessário estabelecer-se um teor de umidade de referência, pois uma espécie de menor resistência, com baixo teor de

¹ Prof. Doutor da Universidade Federal de Mato Grosso, norman@cgi.ufmt.br

² Prof. Titular do Departamento de Engenharia de Estruturas – EESC-USP, calil@sc.usp.br

umidade, pode aparentar maior resistência que uma espécie sabidamente mais resistente, porém com elevado teor de umidade.

A antiga norma brasileira, NBR 7190 - Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1982), baseada no método determinista das tensões admissíveis, simplificava este problema ao recomendar que durante o projeto se considerasse a madeira verde, com umidade acima do ponto de saturação das fibras, situação em que a resistência fica praticamente constante. Com essa postura o dimensionamento subestimava a resistência da madeira, pois uma estrutura de madeira raramente estará em serviço com a madeira verde à exceção de estruturas submersas. No início da construção a madeira pode até estar verde, mas ela secará ao longo da construção, e em serviço terá um teor de umidade muito inferior ao da madeira verde, e portanto uma resistência bem superior.

A nova versão da norma brasileira, NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira, da ABNT (1997), baseada no método probabilista dos estados limites, a exemplo da maioria das normas internacionais, adota a umidade de referência de 12%. Uma espécie, ou peça, é considerada mais resistente que outra, a uma determinada solicitação, se sua resistência, ao teor de umidade de referência de 12%, for superior.

A fixação da umidade de referência acrescenta duas novas questões ao cálculo de estruturas de madeira.

A primeira diz respeito a umidade da madeira em serviço, ou seja, se as condições ambientais acarretarem um teor de umidade da madeira diferente da umidade de referência o que se deve fazer?

Para responder a esta questão a atual norma brasileira, estabelece classes de umidade com a finalidade de ajustar as propriedades de resistência e rigidez da madeira em função das condições ambientais em que permanecerá a estrutura. Na Tabela 1 são apresentadas as classes de umidade.

Tabela 1 - Classes de umidade

CLASSES DE UMIDADE	UMIDADE RELATIVA DO AMBIENTE U_{amb}	UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA
1	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$ durante longos períodos	$\geq 25\%$

Fonte: NBR 7190/97

Conhecida a classe de umidade, em que se supõe a madeira em serviço, pode-se corrigir o valor de cálculo, da resistência ou da rigidez, utilizando o coeficiente parcial de modificação $k_{mod,2}$, que considera o teor de umidade da madeira em serviço e o tipo de material empregado. Na Tabela 2 são apresentados os valores deste coeficiente.

Tabela 2 - Valores de $k_{mod,2}$

CLASSES DE UMIDADE	MADEIRA SERRADA MADEIRA LAMINADA E COLADA MADEIRA COMPENSADA	MADEIRA RECOMPOSTA
(1) e (2)	1,0	1,0
(3) e (4)	0,8	0,9

OBS.: Para madeira submersa, utiliza-se $k_{mod,2} = 0,65$. Fonte: NBR 7190/97

A segunda questão, que se acrescenta com a fixação da umidade de referência, diz respeito ao teor de umidade no instante do ensaio. Ou seja, se durante o ensaio o teor de umidade do corpo de prova não for de exatamente 12%, o que se deve fazer?

Para corrigir os valores de resistência e rigidez, obtidos em um ensaio, para o teor de umidade de referência, a atual norma brasileira adota, para teores de umidade entre 10% e 20%, as seguintes expressões:

$$f_{12} = f_{U\%} \cdot \left[1 + 3 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100} \right) \right] \quad (01)$$

$$E_{12} = E_{U\%} \cdot \left[1 + 2 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100} \right) \right] \quad (02)$$

Nas quais:

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

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

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

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

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

Para teores de umidade acima de 20% a NBR 7190/97, considera que a resistência e a rigidez da madeira sofrem apenas pequenas variações.

Quanto a densidade aparente, outra propriedade que precisa ser reportada ao teor de umidade de referência, a NBR 7190/97 é omissa a respeito de sua correção.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho, é o estudo, teórico e experimental, da influência da umidade da madeira em suas propriedades de resistência e rigidez, com a finalidade

principal de aferir, experimentalmente, a validade do modelo teórico proposto pela atual NBR 7190/97 e, se for o caso, indicar expressões mais adequadas. O estudo envolverá às principais características de resistência e rigidez, bem como a densidade aparente, dando destaque à compressão paralela às fibras, pois esta é a característica adotada pela atual norma brasileira para classificar as espécies em classes de resistência.

3 JUSTIFICATIVA

Ao se preparar um ensaio, com o objetivo de determinar a resistência de um determinado corpo de prova a determinada solicitação, não se conhece o teor de umidade deste corpo de prova. Assim, torna-se necessário corrigir os resultados, obtidos nos ensaios, para a umidade de referência de 12%. A atual norma brasileira, parte de um diagrama apresentado na NBR 6230, da ABNT (1980), que relaciona a resistência à compressão paralela com o teor de umidade, obtido experimentalmente para a Peroba rosa, *Aspidosperma peroba*, e adota, admitindo validade no intervalo de umidade entre 10% e 20%, a seguinte expressão:

$$f_{c0,12\%} = f_{c0,U\%} \cdot \left[1 + 3 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100} \right) \right] \quad (03)$$

Onde:

$f_{c0,12\%}$ = resistência da madeira, à compressão paralela às fibras, ao teor de umidade de referência de 12%;

$f_{c0,U\%}$ = resistência da madeira, à compressão paralela às fibras, ao teor de umidade U%;

U% = teor de umidade da madeira no instante do ensaio

Admitida, com base experimental, a existência de relação entre a resistência da madeira a determinada solicitação com sua resistência à compressão paralela, a atual norma brasileira adota de maneira geral, para correção da resistência da madeira, qualquer que seja a solicitação, a eq. (01), apresentada anteriormente.

Apoiando-se em ensaios complementares e na existência de relação entre a rigidez e a resistência da madeira, mas também partindo do diagrama anteriormente citado, obtido experimentalmente para a Peroba rosa, a atual norma brasileira adota, para correção da rigidez a eq. (02) apresentada anteriormente.

Expressões como as eq. (01) e (02) são de extrema utilidade na homogeneização dos resultados de ensaio, entretanto deve-se ter em mente que os resultados experimentais, obtidos para a Peroba rosa, podem não ser extensíveis a outras espécies ou outras classes de resistência. Além disto é temerário assumir, sem base experimental específica, que o comportamento da rigidez é basicamente o mesmo observado para a resistência.

Outra característica importante que deve ser corrigida para a umidade de referência é a densidade aparente, entretanto a nova versão da norma brasileira é omissa quanto a esta correção.

Justifica-se, dessa forma, a necessidade de aferição das expressões apresentadas pela NBR 7190/97 em outras espécies, ou classes de resistência, e em outras propriedades. Além disso é necessário estabelecer uma forma de corrigir a densidade aparente, para o teor de umidade de referência, se possível tão simples quanto as propostas para resistência e rigidez.

4 COMENTÁRIOS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

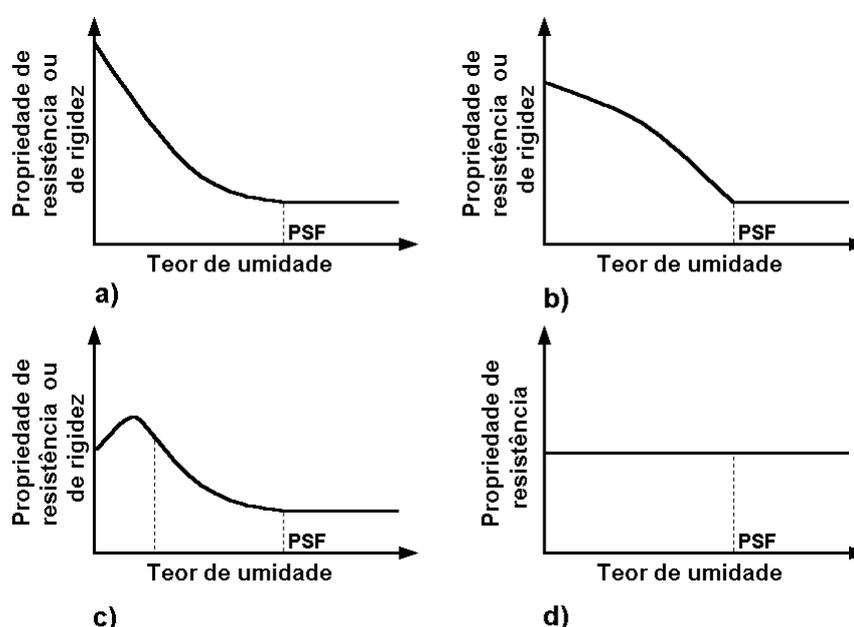


Figura 1 - Curvas típicas utilizadas para representar a influência do teor de umidade sobre as propriedades de resistência e rigidez. As curvas "a" e "c" ocorrem com maior freqüência. A não dependência da propriedade de resistência com o teor de umidade é encontrada na flexão dinâmica

De maneira geral, a revisão bibliográfica aponta para uma relação resistência-umidade na qual: para teores de umidade acima do ponto de saturação das fibras a resistência se mantém praticamente constante; para teores de umidade abaixo deste ponto a resistência aumenta com o decréscimo do teor de umidade, em geral através de uma exponencial muito suave que pode ser associada, para intervalos limitados de umidade, a uma linha reta (ver Figura 1, alíneas a e c). Para teores de umidade mais baixos, em alguns casos, a relação resistência-umidade pode atingir um ponto de máximo, e em seguida decrescer com o decréscimo do teor de umidade (Figura 1, alínea c). Para a rigidez relações semelhantes são observadas. Em alguns casos particulares não existe influência do teor de umidade sobre a propriedade de resistência (Figura 1, alínea d), como por exemplo na flexão dinâmica.

Devido a moderada curvatura no diagrama resistência-umidade, podem ser feitas correções, razoavelmente precisas, assumindo a linearidade, para um limitado intervalo de umidade (BODIG & JAYNE,1992). A linearização às vezes também é utilizada, mesmo para uma variação de umidade desde a condição seca em estufa até o ponto de saturação das fibras. Nestes casos, porém os erros podem chegar a 10 ou 20%. Assim, a hipótese de linearidade do diagrama resistência-umidade só é recomendável para pequenos intervalos de umidade.

KARLSEN et al. (1967) também utilizam uma correção linear para a resistência, mas indicam coeficientes diferentes para diferentes solicitações e espécies. A expressão utilizada por KARLSEN et al. (1967), que corrige a resistência para o teor de umidade de 15%, tem validade no intervalo de umidade de 8% a 23%, e é dada por:

$$f_{15} = f_{U\%} \cdot [1 + \alpha \cdot (U\% - 15)] \quad (04)$$

Onde:

f_{15} = resistência a um teor de umidade de 15%;

$f_{U\%}$ = resistência a um teor de umidade de U%;

U% = teor de umidade da madeira, em %, e

α = coeficiente de correção, que varia com a espécie e a forma de aplicação do esforço.

A eq. (04), também utilizada por DESLANDES & VANDENBERGHE (1959), é muito parecida com o modelo proposto pela NBR 7190/97, embora utilize coeficientes diferentes conforme a propriedade e a espécie em estudo. Assim este modelo parece adequado para especificar um modelo de regressão.

Para madeiras brasileiras, os resultados de alguns trabalhos, realizados sob a égide da antiga NBR 6230, da ABNT (1980), não podem ser aproveitados integralmente. O módulo de elasticidade, obtido com as prescrições daquela norma, era oriundo do ensaio de flexão e, segundo LAHR (1983), para este ensaio a relação altura/vão do corpo de prova era tal que a influência da força cortante na deformação não podia ser desprezada, assim o módulo de elasticidade obtido era apenas um valor aparente. A resistência ao cisalhamento, obtida com as prescrições da NBR 6230/80, não tinha a orientação do plano de cisalhamento claramente definida, portanto os resultados misturam orientações diferentes, aumentando a variabilidade e diminuindo a confiabilidade dos resultados. Para a resistência à tração paralela, a pequena espessura do corpo de prova, pode conduzir, nas espécies de anéis de crescimento largos, ensaios da madeira de apenas um dos anéis, para evitar isto basta fazer coincidir a direção tangencial à espessura do corpo de prova.

Alguns autores, como GREEN & PELLERIN (1991) e MADSEN (1992), mostram que a relação resistência-umidade pode ser diferente para propriedades diferentes ou para madeiras de qualidade diferente. A resistência à compressão paralela às fibras é, segundo MADSEN (1992), altamente sensível à variação do teor de umidade, já a resistência à tração paralela às fibras e o módulo de elasticidade são menos sensíveis, enquanto que a resistência à flexão dinâmica, agora segundo KRECH (1960), praticamente não é afetada pela variação do teor de umidade. LIMA

et al. (1986) observaram, para o Eucalipto Saligna, *Eucalyptus saligna*, a não dependência da resistência à tração normal às fibras com a variação do teor de umidade. MADSEN (1992), por sua vez, conclui para o "Southern pine", que as propriedades de tração e compressão normal são altamente sensíveis à variação do teor de umidade.

Outro ponto importante a ressaltar diz respeito ao processo de secagem. Processos de secagem mais severos, segundo GREEN & PELLERIN (1991), causam maiores gradientes de umidade no corpo de prova e devem ser evitados. Estes gradientes de umidade podem alterar a relação resistência-umidade, BETTS³ apud KOLLMANN & COTÉ (1984) mostrou que isto é fato para a resistência à flexão.

O ideal, provavelmente, seria utilizar uma câmara (ou sala) de climatização, na qual os corpos de prova pudessem ser condicionados, em condições preestabelecidas de temperatura e umidade relativa do ar, até atingir um determinado teor de umidade. Em seguida, o clima da câmara seria alterado, para condicionar os corpos de prova a uma umidade menor, e assim sucessivamente até se completar a secagem.

Por outro lado, os estudos de MADSEN (1992) o levaram a concluir que a secagem ao ar, muito mais simples e representativa da rotina laboratorial, produz, no intervalo de interesse deste trabalho (teor de umidade entre 10% e 20%), os mesmos resultados da secagem tida como ideal descrita acima.

Quanto a metodologia para seleção da amostra, percebe-se a necessidade de definir comportamento através do indivíduo (um corpo de prova). Da impossibilidade deste procedimento, devido a natureza destrutiva dos ensaios de resistência, podem ser utilizados corpos de prova muito semelhantes: de uma mesma região da árvore, como fizeram LIMA et al. (1986); de uma única barra, como fez HELLMEISTER (1983); ou subdividindo os resultados de uma amostra muito grande em percentis de resistência, como fizeram GREEN & PELLERIN (1991).

A utilização de corpos de prova não semelhantes pode causar um erro na especificação do modelo adotado. Imagine, a título de exemplo, uma família de curvas que representem a relação resistência-umidade de uma determinada espécie (ou grupo de espécies de mesma classe de resistência), como as curvas quase paralelas apresentadas na Figura 2. Retirando-se uma amostra, contendo pontos em diferentes curvas desta família, corre-se o risco de obter uma curva ajustada à amostra que nada tem a ver com o comportamento esperado (ver Figura 2).

³ BETTS, H. S. (1919). **Timber, its strength, seasoning and grading**. New York, p.31 apud KOLLMANN, F. F. 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.

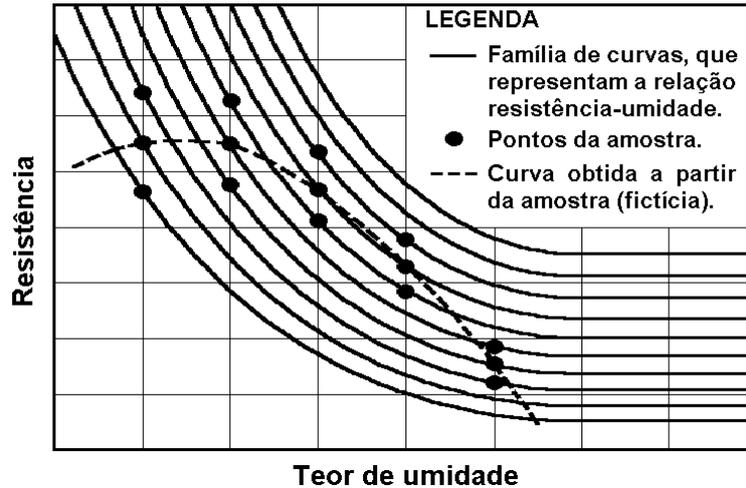


Figura 2 - Uma amostra, refletindo a enorme variabilidade da madeira, pode causar um erro de especificação no modelo da relação resistência-umidade. O comportamento depende do indivíduo

Para a densidade aparente, cuja correção, para o nível de umidade de 12%, foi omitida pela NBR 7190/97, BROCHARD (1960) apresenta a expressão simplificada da eq. (05), LOGSDON (1992) apresenta a expressão (06), também apresentada por DESLANDES & VANDERBERGHE (1959). Estas expressões e uma semelhante à expressão proposta pela NBR 7190/97, para as propriedades de resistência e rigidez, podem servir de modelo para o estudo da correção da densidade aparente ao nível de umidade de 12%.

$$\rho_{12} = \rho_{U\%} \cdot \frac{\left(1 + \frac{12}{100}\right)}{\left(1 + \frac{U\%}{100}\right)} \quad (05)$$

$$\rho_{12} = \rho_{U\%} + \rho_{U\%} \cdot \left[(1 - \delta_V) \cdot \frac{(12 - U\%)}{100} \right], \text{ com } \delta_V = \frac{\Delta V}{U\%} \text{ e } \Delta V = \frac{V_{U\%} - V_{seca}}{V_{seca}} \cdot 100 \quad (06)$$

Nas quais:

ρ_{12} = densidade aparente, em g/cm³, ao teor de umidade 12%;

$\rho_{U\%}$ = densidade aparente, em g/cm³, ao teor de umidade U%;

U% = teor de umidade, em %;

δ_V = coeficiente de retratibilidade volumétrica;

ΔV = retração volumétrica, para a variação de umidade entre U% e 0%, em %;

$V_{U\%}$ = volume, do corpo de prova, ao teor de umidade U%, e

V_{seca} = volume, do corpo de prova, para a madeira seca U=0%.

Dessa forma, pode-se concluir que a influência do teor de umidade sobre as propriedades de resistência e rigidez da madeira ainda não está claramente estabelecida. Existe a necessidade de aferir esta influência utilizando-se a metodologia de ensaio atual e individualizando o estudo do comportamento com o uso de corpos de prova muito semelhantes. É necessário, também, avaliar a influência do teor de umidade sobre as propriedades de resistência e rigidez da madeira de diferentes espécies (ou classes de resistência) e em diferentes propriedades. Além disso é importante definir uma expressão para o ajuste da densidade aparente, ao teor de umidade de referência.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Seleção das espécies

Com o intuito de tornar o trabalho representativo das sete classes de resistência definidas pela NBR 7190/97, foram selecionadas sete espécies de modo que cada uma representasse uma classe de resistência.

Segundo o anexo F da NBR 7190/97, pode-se aceitar a relação:

$$f_{c0,k} = 0,70.f_{c0,m} \quad (07)$$

Onde:

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

$f_{c0,m}$ = resistência média à compressão paralela às fibras;

No anexo E da NBR 7190/97, são fornecidos alguns valores médios de espécies nativas e de florestamento. A partir destes valores, aplicando-se a eq. (07), montou-se a Tabela 3, na qual são apresentadas as espécies selecionadas e suas respectivas classes de resistência.

Tabela 3 - Seleção das espécies

ESPÉCIE SELECIONADA (NOME VULGAR)	$f_{c0,m}$ (MPa)	$f_{c0,k}$ (MPa)	CLASSE PROVÁVEL DE RESISTÊNCIA	
			CONÍFERAS	DICOTILEDÔNEAS
Pinus bahamensis	32,60	22,82	C 20	
Pinus elliottii	40,40	28,28	C 25	
Pinus taeda	44,40	31,08	C 30	
Eucalipto grandis	40,30	28,21		C 20
Cupiúba	54,40	38,08		C 30
Eucalipto citriodora	62,00	43,40		C 40
Jatobá	93,30	65,31		C60

5.2 Amostragem e ensaios programados

A conclusão da revisão bibliográfica mostrando que o estudo de um comportamento deve ter origem no indivíduo, serviu de orientação para que fossem utilizados corpos de prova semelhantes, retirados ao longo de uma única barra de cada espécie. Considerando-se que o estudo pretende ser abrangente às madeiras e que a variabilidade dos resultados é maior entre as espécies, que entre as árvores de uma mesma espécie, se optou por estudar apenas uma árvore (no caso uma barra) de cada espécie e premiar um maior número de espécies (no caso sete, uma para cada classe de resistência, como se apresenta na Tabela 3).

A possibilidade de existência de comportamento diferenciado, conforme a propriedade em estudo, direcionou o trabalho no sentido de se estudar a influência do teor de umidade sobre algumas propriedades da madeira. A madeira possui inúmeras propriedades, portanto, resolveu-se selecionar as propriedades de maior interesse prático para o projeto de estruturas de madeira.

A seleção das propriedades da madeira considerou o fato da atual NBR 7190/97 definir três níveis de caracterização para as propriedades da madeira: completa, mínima e simplificada. A caracterização completa da resistência prevê a realização de ensaios de todas as propriedades mecânicas, nas direções paralela e normal às fibras, além das densidades básica e aparente. A caracterização mínima, por sua vez, prevê a realização dos ensaios de compressão, tração e cisalhamento, todos na direção paralela às fibras, além dos ensaios de densidade básica e aparente. Já a caracterização simplificada prevê apenas o ensaio de compressão paralela às fibras.

Por outro lado as propriedades de resistência da madeira, na direção normal às fibras, podem ser consideradas como de importância secundária no cálculo de estruturas de madeira. O cisalhamento não acontece na direção normal às fibras. A tração normal às fibras, deve ser evitada segundo a NBR 7190/97. E a compressão normal às fibras não apresenta ruptura, entendida como a ausência da capacidade de transmitir esforços.

A densidade básica, por sua vez, independe do teor de umidade, pois é definida, no item B.6.2 da NBR 7190/97, por:

$$\rho_{\text{bas}} = \frac{m_0}{V_{\text{sat}}} \quad (08)$$

Onde:

ρ_{bas} = densidade básica;

m_0 = massa seca da madeira, e

V_{sat} = volume da madeira saturada.

Resolveu-se, assim, envolver neste trabalho as seguintes propriedades (caracterização mínima): compressão paralela às fibras; módulo de elasticidade longitudinal; tração paralela às fibras; cisalhamento paralelo às fibras, e densidade aparente. O módulo de elasticidade longitudinal e a densidade aparente serão obtidos do ensaio de compressão paralela.

Considerando que as rupturas por tração paralela e por cisalhamento são frágeis, e que o ensaio de tração paralela é de difícil realização, resolveu-se adotar uma amostra maior para os ensaios de cisalhamento e uma amostra mínima para os ensaios de tração, pois para as duas propriedades se espera um mesmo comportamento da relação resistência-umidade.

Segundo o anexo B da NBR 7190/97 os corpos de prova para o ensaio de cisalhamento, são confeccionados com as direções principais bem definidas. Nos ensaios de tração paralela a boa definição das direções principais, dos corpos de prova, evita problemas nos ensaios em madeiras com anéis de crescimento largos.

Assim, serão necessárias, para cada espécie em estudo, duas barras: uma para retirar os corpos de prova de compressão paralela; e outra, com as direções principais bem definidas, para retirar os corpos de prova de tração paralela e cisalhamento.

Para que os corpos de prova pudessem ser confeccionados a partir de barras de comprimento usual no comércio (em torno de 4,00 m), resolveu-se adotar as quantidades de corpos de prova indicadas na Tabela 4. Deve-se salientar que não há necessidade de uma amostra muito grande para se realizar uma análise de regressão adequada, ou seja, bastam alguns resultados no intervalo de umidade entre 10% e 20%.

Tabela 4 - Quantidade de corpos de prova, ou de ensaios, prevista

PROPRIEDADES	NÚMERO DE CORPOS DE PROVA POR ESPÉCIE	NÚMERO DE ESPÉCIES	TOTAL
Resistência à compressão paralela às fibras, módulo de elasticidade longitudinal e densidade aparente	20	7	140
Resistência à tração paralela às fibras	8	7	56
Resistência ao cisalhamento	18	7	126
TOTAIS	46	7	322

5.3 Obtenção e identificação da madeira necessária

Inicialmente se procurou obter a madeira no comércio de São Carlos e foram encontradas, entre as espécies selecionadas, a Cupiúba e o Jatobá. As demais espécies foram obtidas no Instituto Florestal, da Prefeitura Municipal de Itirapina, que forneceu um toro, com aproximadamente 3,50 m de comprimento e 40 cm de diâmetro, de cada espécie solicitada.

O desdobro dos toros foi orientado no sentido de obter barras, de seção transversal 6 cm x 12 cm, em posições que possibilitassem a retirada de corpos de prova, para os ensaios de tração e cisalhamento, com as direções principais bem definidas. As barras adquiridas no comércio de São Carlos foram escolhidas, com a preocupação de apresentarem a posição dos anéis de crescimento equivalentes à

situação descrita para as barras retiradas dos toros. A Figura 3 apresenta a posição da retirada das barras e a orientação de seus anéis de crescimento.

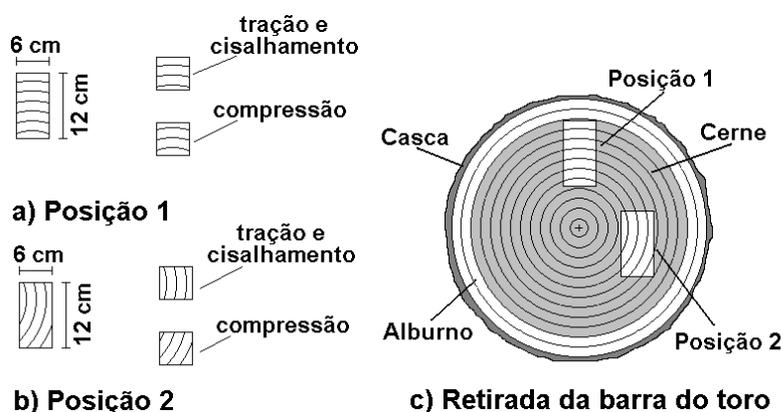


Figura 3 – Posição da retirada das barras e orientação de seus anéis de crescimento

Em seguida, pequenos pedaços da madeira e, quando possível, da casca foram encaminhados à Faculdade de Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Mato Grosso, para identificação das espécies utilizadas. A identificação foi feita pelo Prof. Zenesio Finger⁴, que confirmou as espécies utilizadas, apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Espécies utilizadas

NOME VULGAR	ESPÉCIE	FAMÍLIA
	NOME CIENTÍFICO	
Pinus bahamensis	<i>Pinus caribea</i> Morelet var <i>bahamensis</i> (Griseb) Barret et Golfari	Pinaceae
Pinus elliottii	<i>Pinus elliottii</i> Engelm	Pinaceae
Pinus taeda	<i>Pinus taeda</i> L.	Pinaceae
Eucalipto grandis	<i>Eucalyptus grandis</i> (Hill) Maiden	Myrtaceae
Cupiúba	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	Celastraceae
Eucalipto citriodora	<i>Eucalyptus citriodora</i> Hook	Myrtaceae
Jatobá	<i>Hymenaeae stilbocarpa</i> Hayne	Leguminosae

5.4 Procedimento de secagem e controle do teor de umidade

Após a obtenção da madeira necessária, os corpos de prova foram confeccionados, de acordo com a NBR 7190/97 e imersos em água destilada, para recuperar o teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras, por aproximadamente dez dias.

⁴ Professor Adjunto da Faculdade de Engenharia Florestal - Universidade Federal de Mato Grosso. Mestre em Ciências Florestais com extensa experiência nas áreas de Dendrologia e Anatomia da Madeira.

Após o período de imersão, as dimensões e massa de cada corpo de prova foram avaliadas e registradas, respectivamente, com precisão de 0,01 mm e 0,01 g. As massas foram avaliadas em uma balança analítica e as dimensões em um paquímetro digital.

Um primeiro corpo de prova, de cada tipo de ensaio (compressão, tração e cisalhamento) e espécie, foi ensaiado e em seguida colocado em uma estufa de esterilização e secagem, a uma temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$, para a completa secagem e determinação do teor de umidade. A determinação do teor de umidade é análoga à descrita no item B.5 da NBR 7190/97, entretanto utiliza diretamente o corpo de prova, do ensaio em avaliação, inteiro.

Os demais corpos de prova, foram colocados para secar ao ar, em condições gerais de laboratório.

O teor de umidade, deste primeiro ensaio, foi admitido, por hipótese, como sendo o teor de umidade inicial de todos os corpos de prova, para cada tipo de ensaio e de cada espécie, uma vez que suas condições iniciais, após a recuperação da umidade em água destilada, eram, teoricamente, as mesmas. Conhecida a massa inicial, de cada corpo de prova, foi possível estimar a massa seca, ver eq. (09), e a massa que deveria atingir a um determinado teor de umidade, ver eq. (10).

$$U\%_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} \cdot 100 \Rightarrow m_0 = \frac{m_i}{\left(1 + \frac{U\%_i}{100}\right)} \quad (09)$$

$$U\% = \frac{m_{U\%} - m_0}{m_0} \cdot 100 \Rightarrow m_{U\%} = m_0 \cdot \left(1 + \frac{U\%}{100}\right) \Rightarrow m_{U\%} = m_i \cdot \frac{\left(1 + \frac{U\%}{100}\right)}{\left(1 + \frac{U\%_i}{100}\right)} \quad (10)$$

Onde:

$U\%_i$ = teor de umidade inicial do corpo de prova, adotada por espécie como sendo a umidade do primeiro corpo de prova ensaiado, em %;

$U\%$ = teor de umidade, que se pretende ensaiar o corpo de prova, em %;

m_0 = estimativa da massa seca do corpo de prova, com a hipótese de que $U\%_i$ seja a umidade inicial do corpo de prova;

m_i = massa inicial do corpo de prova, com a hipótese de ter o teor de umidade $U\%_i$;

$m_{U\%}$ = estimativa da massa do corpo de prova, quando seu teor de umidade dor $U\%$;

A partir da eq. (10) foi possível montar uma tabela associando o teor de umidade à massa esperada do corpo de prova. O acompanhamento diário da massa de cada corpo de prova, através de uma balança analítica com 0,01g de precisão, a medida em que secavam, permitia estimar o teor de umidade em que se encontrava cada corpo de prova e, assim, distribuir o teor de umidade dos ensaios de maneira mais ou menos uniforme.

Procurou-se ensaiar o maior número de corpos de prova no intervalo de umidade entre 10% e 20%, e apenas alguns ensaios com teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras e abaixo de 10%.

Uma fixação rígida dos níveis de umidade a serem avaliados não foi possível, pois fatores como a variabilidade natural do teor de umidade inicial dos corpos de prova e a disponibilidade de pessoal, ou de equipamento, para realizar os ensaios, principalmente nos feriados, impediam fixar com maior precisão o teor de umidade para realização do ensaio.

Depois de aproximadamente quarenta dias a massa, de cada corpo de prova, praticamente não variava mais (variação diária menor que 0,5%). A secagem ao ar foi dada como terminada.

Concluída a secagem ao ar, os corpos de prova foram colocados em uma estufa de esterilização e secagem, a um nível de temperatura de 40°C por dois dias. A cada dois dias o nível de temperatura era elevado, respectivamente, para 60°C, 80°C e 103±2°C, até a completa secagem.

Sempre que um corpo de prova atingisse um nível de umidade de interesse, durante todo o processo de secagem, ele era ensaiado.

5.5 Ensaios

Os ensaios de compressão paralela, tração paralela e cisalhamento, bem como a obtenção da umidade e da densidade aparente, foram realizados de acordo com a metodologia proposta no anexo B da NBR 7190/97.

5.6 Análise estatística

Para a análise estatística foram usados dois procedimentos: a análise de regressão, linear simples ou múltipla e o teste de Tukey.

A análise de regressão, bem apresentada e discutida por FONSECA et al. (1976) e DRAPER & SMITH (1981), foi utilizada no ajuste dos dados experimentais ao modelo especificado. Inicialmente os dados foram ajustados ao modelo que deu origem à proposta da NBR 7190/97 e como este modelo apresentou bom ajuste não foram testados novos modelos, tendo em vista que o objetivo do trabalho é aferir o modelo proposto pela NBR 7190.

O modelo que deu origem à proposta da atual norma brasileira NBR 7190/97 é apresentado em seguida:

$$f_{12} = f_{U\%} \cdot \left[1 + \frac{\alpha \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (11)$$

Onde:

f_{12} = resistência a um teor de umidade de 12%;

$f_{U\%}$ = resistência a um teor de umidade de U%;

U% = teor de umidade da madeira, em %, e

α = coeficiente de correção. A NBR 7190/97 adota $\alpha = 3$ para a correção da resistência e $\alpha = 2$ para correção do módulo de elasticidade.

Linearizando o modelo apresentado na eq. (11), obtém-se:

$$\frac{f_{12} - f_{U\%}}{f_{U\%}} = \alpha \cdot \frac{U\% - 12}{100} \quad (12)$$

A eq. (12) representa um modelo para regressão linear simples, que passa pela origem do sistema, nas variáveis:

$$Y = \frac{f_{12} - f_{U\%}}{f_{U\%}} \quad \text{e} \quad X = \frac{U\% - 12}{100} \quad (13)$$

Esta regressão linear é de execução muito simples e pode ser feita diretamente em um aplicativo de planilha eletrônica como o Microsoft Excel. Entretanto, o valor de f_{12} precisa ser estimado. Considerando que a curva resistência-umidade é suave e pode ser substituída por linhas retas em pequenos intervalos de umidade, pode-se estimar f_{12} por interpolação linear de dois resultados, com teor de umidade próximo a 12%.

Este procedimento, que pode ser utilizado para as relações rigidez-umidade e densidade-umidade, fornecerá novos valores para o coeficiente α . Caso os valores de α , obtidos nas diversas espécies e formas de solicitação, sejam próximos pode-se verificar o modelo com coeficiente único, caracterizado pela média destes valores.

O Teste de Tukey, bem apresentado e discutido por GOMES (1982), é utilizado para a comparação de múltiplas médias. Por exemplo, para verificar se dois ou mais modelos, conduzem a um mesmo valor médio de f_{12} .

Este teste será utilizado, no intervalo de umidade entre 10% e 20%, para verificar se o modelo que deu origem ao proposto pela NBR 7190/97, com um coeficiente único $\alpha=3$ (ou $\alpha=2$), ou com um coeficiente único $\alpha=\alpha_{\text{médio}}$ (valor médio entre as espécies estudadas), ou com o coeficiente obtido na regressão de cada caso $\alpha=\alpha_{\text{reg}}$, conduzem ao valor médio, obtido experimentalmente, de f_{12} . Um programa estatístico será utilizado para fazer este teste, no caso o Statgraphics (Statistical Graphics System).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Ensaios e regressões

Os ensaios foram realizados em conformidade com a NBR 7190/97 a medida que o corpo de prova, em processo de secagem, apresentasse uma estimativa de umidade de interesse para o estudo.

Obtidos os resultados foi feita a análise de regressão, como descrito em 5.8, para o intervalo de umidade $10\% \leq U\% \leq 20\%$. Em seguida os resultados foram colocados em um gráfico, e três curvas foram ajustadas a eles:

- Para umidade abaixo de 10%, foi feito um ajuste manual;
- Para umidade no intervalo $10\% \leq U\% \leq 20\%$, os resultados foram ajustados à curva obtida na regressão. Para umidade no intervalo $20\% \leq U\% \leq \text{PSF}\%$, onde PSF é o ponto de saturação das fibras, foi mantida a curva de regressão obtida para o intervalo $10\% \leq U\% \leq 20\%$;
- Para umidade acima do ponto de saturação das fibras, os resultados foram ajustados ao valor médio no intervalo (PSF foi admitido como aproximadamente 28%).

6.1.1 Resistência à compressão paralela

Para a resistência à compressão paralela às fibras não foi necessário o ajuste manual dos resultados, no intervalo de umidade abaixo de 10%, pois, aparentemente, a curva obtida na análise de regressão, para o intervalo de umidade $10\% \leq U\% \leq 20\%$, pode ser aceita também abaixo de 10% de umidade. Os resultados são apresentados na Figura 4 e na Tabela 6.

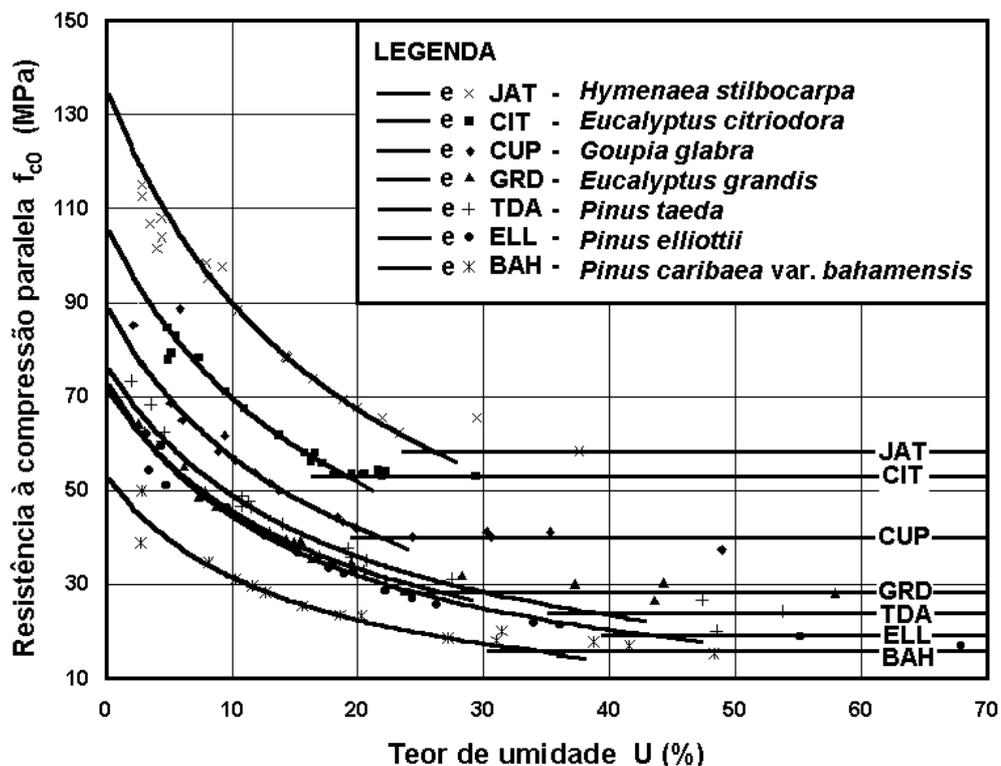


Figura 4 – Variação da resistência à compressão paralela às fibras com a umidade

Tabela 6 - Curvas ajustadas (Resistência à compressão paralela às fibras)

ESPÉCIE (NOME CIENTÍFICO)	CURVA AJUSTADA PARA O INTERVALO	
	$0\% \leq U\% \leq \text{PSF}\%$ *	$U\% \geq \text{PSF}\%$
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i>	$f_{c0,U\%} = \frac{29,26}{1 + 3,7417 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9968$	$f_{c0,PSF\%} = 15,78\text{MPa}$ (valor médio)
<i>Pinus elliottii</i>	$f_{c0,U\%} = \frac{41,34}{1 + 3,6339 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9675$	$f_{c0,PSF\%} = 19,36\text{MPa}$ (valor médio)
<i>Pinus taeda</i>	$f_{c0,U\%} = \frac{45,78}{1 + 3,3670 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9738$	$f_{c0,PSF\%} = 23,77\text{MPa}$ (valor médio)
<i>Eucalyptus grandis</i>	$f_{c0,U\%} = \frac{42,57}{1 + 3,4026 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,882$	$f_{c0,PSF\%} = 28,34\text{MPa}$ (valor médio)
<i>Goupia glabra</i>	$f_{c0,U\%} = \frac{53,41}{1 + 3,3618 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9974$	$f_{c0,PSF\%} = 40,03\text{MPa}$ (valor médio)
<i>Eucalyptus citriodora</i>	$f_{c0,U\%} = \frac{65,30}{1 + 3,2169 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9583$	$f_{c0,PSF\%} = 53,08\text{MPa}$ (um só valor)
<i>Hymenaea stilbocarpa</i>	$f_{c0,U\%} = \frac{84,34}{1 + 3,1542 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9989$	$f_{c0,PSF\%} = 58,41\text{MPa}$ (um só valor)

* A regressão foi feita para o intervalo de umidade $10\% \leq U\% \leq 20\%$, entretanto parece bem ajustada ao restante do intervalo. Nas expressões, U% deve estar em % e $f_{c0,U\%}$ em MPa.

6.1.2 Resistência à tração paralela

Para a resistência à tração paralela às fibras foram obtidos os resultados apresentados na Figura 5 e na Tabela 7.

Tabela 7 - Curvas ajustadas (Resistência à tração paralela às fibras)

ESPÉCIE (NOME CIENTÍFICO)	CURVA AJUSTADA PARA O INTERVALO	
	$10\% \leq U\% \leq PSF\%$ *	$U\% \geq PSF\%$
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i>	$f_{t0,U\%} = \frac{60,85}{1 + 2,4000 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9971$	$f_{t0,PSF\%} = 34,93MPa$ (valor médio)
<i>Pinus elliottii</i>	$f_{t0,U\%} = \frac{67,84}{1 + 2,2861 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9938$	$f_{t0,PSF\%} = 45,52MPa$ (valor médio)
<i>Pinus taeda</i>	$f_{t0,U\%} = \frac{81,51}{1 + 2,1762 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9938$	$f_{t0,PSF\%} = 60,06MPa$ (valor médio)
<i>Eucalyptus grandis</i>	$f_{t0,U\%} = \frac{75,31}{1 + 2,2397 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9780$	$f_{t0,PSF\%} = 50,46MPa$ (um só valor)
<i>Goupia glabra</i>	$f_{t0,U\%} = \frac{62,48}{1 + 2,3846 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9900$	$f_{t0,PSF\%} = 45,27MPa$ (valor médio)
<i>Eucalyptus citriodora</i>	$f_{t0,U\%} = \frac{132,49}{1 + 2,0740 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9950$	$f_{t0,PSF\%} = 103,78MPa$ (um só valor)
<i>Hymenaea stilbocarpa</i>	$f_{t0,U\%} = \frac{164,74}{1 + 2,0266 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9966$	$f_{t0,PSF\%} = 124,16MPa$ (um só valor)

* A regressão foi feita para o intervalo de umidade $10\% \leq U\% \leq 20\%$, entretanto parece bem ajustada ao restante do intervalo. Para umidade abaixo de 10% o ajuste foi manual. Nas expressões, U% deve estar em % e $f_{t0,U\%}$ em MPa.

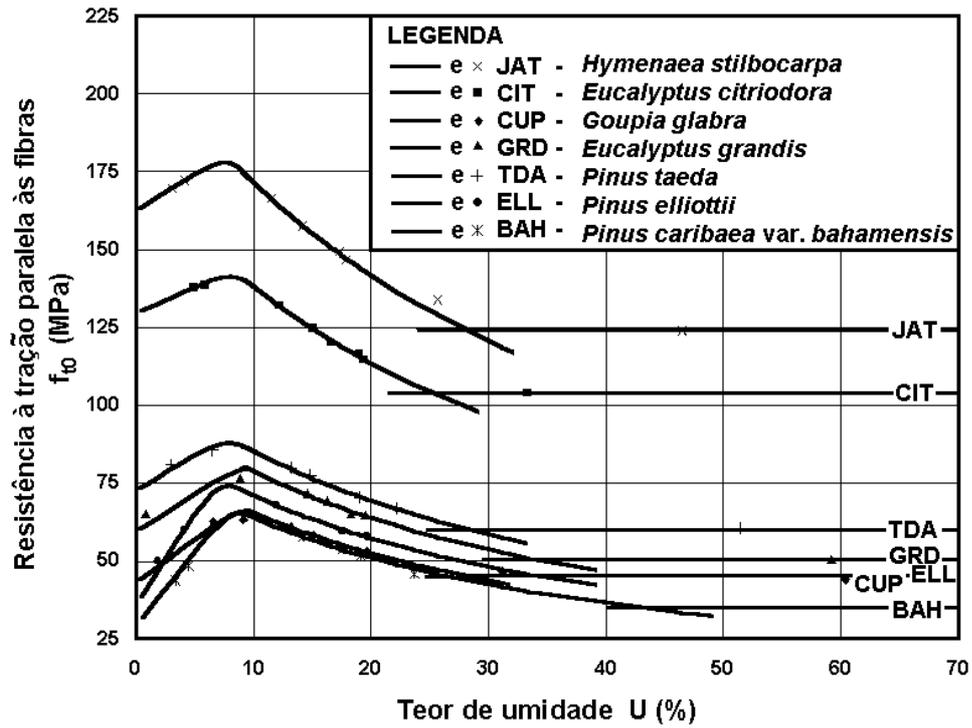


Figura 5 - Variação da resistência à tração paralela às fibras com a umidade

6.1.3 Resistência ao cisalhamento paralelo

Para a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras foram obtidos os resultados apresentados na Figura 6 e na Tabela 8.

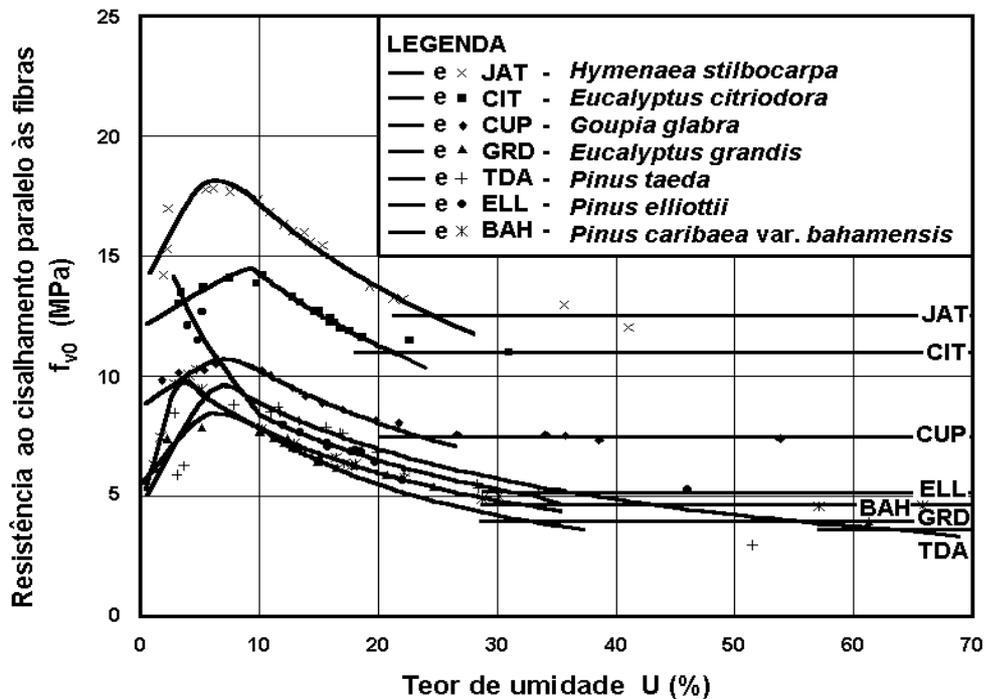


Figura 6 - Variação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras com a umidade

Tabela 8 - Curvas ajustadas (Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras)

ESPÉCIE (NOME CIENTÍFICO)	CURVA AJUSTADA PARA O INTERVALO	
	$10\% \leq U\% \leq \text{PSF}\%$ *	$U\% \geq \text{PSF}\%$
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i>	$f_{v0,U\%} = \frac{7,40}{1 + 2,9159 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9905$	$f_{v0,PSF\%} = 4,67 \text{MPa}$ (valor médio)
<i>Pinus elliottii</i>	$f_{v0,U\%} = \frac{7,96}{1 + 2,7667 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9594$	$f_{v0,PSF\%} = 5,15 \text{MPa}$ (valor médio)
<i>Pinus taeda</i>	$f_{v0,U\%} = \frac{8,45}{1 + 2,5997 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9525$	$f_{v0,PSF\%} = 3,74 \text{MPa}$ (valor médio)
<i>Eucalyptus grandis</i>	$f_{v0,U\%} = \frac{7,26}{1 + 3,0512 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9205$	$f_{v0,PSF\%} = 3,97 \text{MPa}$ (um só valor)
<i>Goupia glabra</i>	$f_{v0,U\%} = \frac{9,73}{1 + 2,5692 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9921$	$f_{v0,PSF\%} = 7,47 \text{MPa}$ (valor médio)
<i>Eucalyptus citriodora</i>	$f_{v0,U\%} = \frac{13,57}{1 + 2,5384 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9948$	$f_{v0,PSF\%} = 11,01 \text{MPa}$ (um só valor)
<i>Hymenaea stilbocarpa</i>	$f_{v0,U\%} = \frac{16,36}{1 + 2,4079 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9643$	$f_{v0,PSF\%} = 12,52 \text{MPa}$ (valor médio)

* A regressão foi feita para o intervalo de umidade $10\% \leq U\% \leq 20\%$, entretanto parece bem ajustada ao restante do intervalo. Para umidade abaixo de 10% o ajuste foi manual. Nas expressões, U% deve estar em % e $f_{v0,U\%}$ em MPa.

6.1.4 Módulo de elasticidade longitudinal

Para o módulo de elasticidade longitudinal foram obtidos os resultados apresentados na Figura 7 e na Tabela 9.

Tabela 9 - Curvas ajustadas (Módulo de elasticidade longitudinal)

ESPÉCIE (NOME CIENTÍFICO)	CURVA AJUSTADA PARA O INTERVALO	
	$10\% \leq U\% \leq \text{PSF}\%$ *	$U\% \geq \text{PSF}\%$
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i>	$E_{c0,U\%} = \frac{6944,72}{1 + 1,5327 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9676$	$E_{c0,PSF\%} = 4237,98 \text{MPa}$ (valor médio)
<i>Pinus elliotii</i>	$E_{c0,U\%} = \frac{11755,76}{1 + 2,1859 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9448$	$E_{c0,PSF\%} = 6758,87 \text{MPa}$ (valor médio)
<i>Pinus taeda</i>	$E_{c0,U\%} = \frac{13511,31}{1 + 2,5614 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9570$	$E_{c0,PSF\%} = 10017,14 \text{MPa}$ (valor médio)
<i>Eucalyptus grandis</i>	$E_{c0,U\%} = \frac{12909,43}{1 + 2,1779 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9093$	$E_{c0,PSF\%} = 9954,60 \text{MPa}$ (valor médio)
<i>Goupia glabra</i>	$E_{c0,U\%} = \frac{14472,08}{1 + 2,7697 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9673$	$E_{c0,PSF\%} = 10476,01 \text{MPa}$ (valor médio)
<i>Eucalyptus citriodora</i>	$E_{c0,U\%} = \frac{17995,27}{1 + 2,8058 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9864$	$E_{c0,PSF\%} = 15042,24 \text{MPa}$ (um só valor)
<i>Hymenaea stilbocarpa</i>	$E_{c0,U\%} = \frac{26748,57}{1 + 2,8416 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$ $R^2 = 0,9992$	$E_{c0,PSF\%} = 20836,89 \text{MPa}$ (um só valor)

* A regressão foi feita para o intervalo de umidade $10\% \leq U\% \leq 20\%$, entretanto parece bem ajustada ao restante do intervalo. Para umidade abaixo de 10% o ajuste foi manual. Nas expressões, U% deve estar em % e $E_{c0,U\%}$ em MPa.

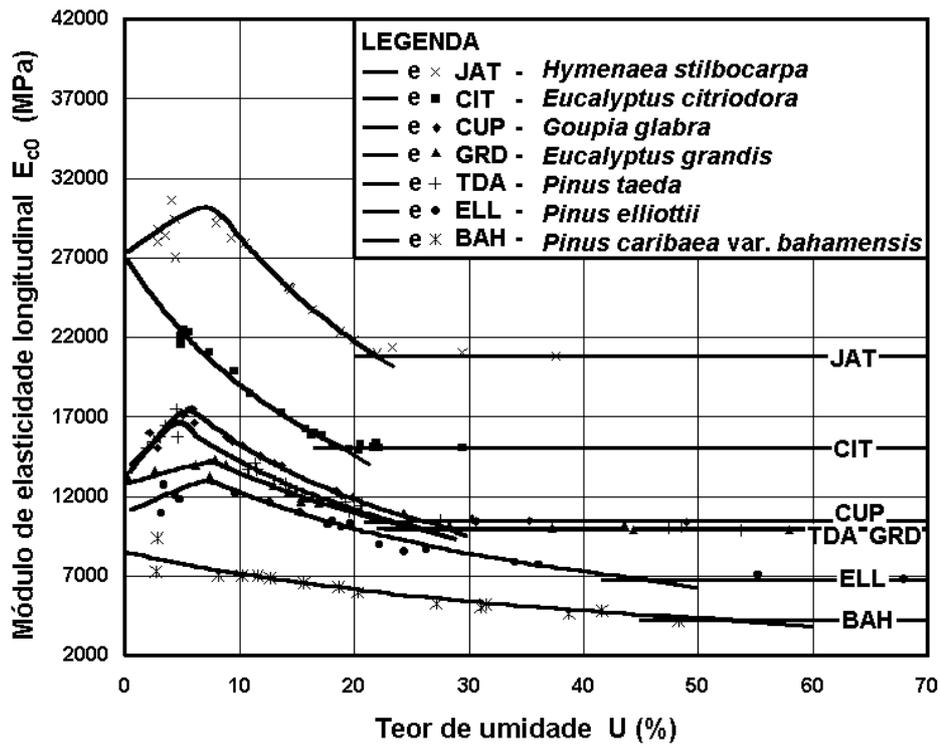


Figura 7 - Variação do módulo de elasticidade longitudinal, extraído do ensaio de compressão paralela às fibras, com a umidade

6.1.5 Densidade aparente

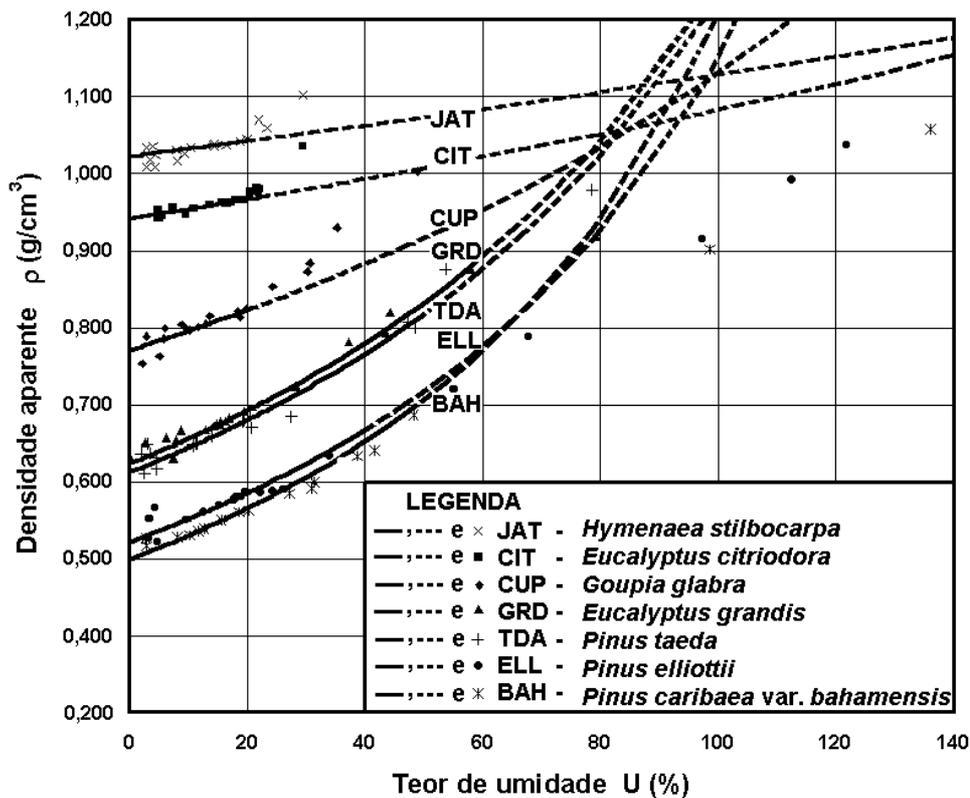


Figura 8 - Variação da densidade aparente com a umidade

Utilizando o mesmo modelo de regressão, utilizado para as propriedades de resistência e rigidez da madeira, no estudo da densidade aparente, se obtém um valor negativo para o coeficiente α , indicando um aumento da densidade aparente com o aumento da umidade. Para a densidade aparente foram obtidos os resultados apresentados na Figura 8 e na Tabela 10.

Tabela 10 – Curvas ajustadas (Densidade aparente)

ESPÉCIE (NOME CIENTÍFICO)	CURVA AJUSTADA PARA O INTERVALO $0\% \leq U\% \leq \text{PSF}\%$ *	
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i>	$\rho_{U\%} = \frac{0,538}{1 - 0,6300 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$	$R^2 = 0,9962$
<i>Pinus elliottii</i>	$\rho_{U\%} = \frac{0,559}{1 - 0,5835 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$	$R^2 = 0,9934$
<i>Pinus taeda</i>	$\rho_{U\%} = \frac{0,652}{1 - 0,5340 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$	$R^2 = 0,9974$
<i>Eucalyptus grandis</i>	$\rho_{U\%} = \frac{0,664}{1 - 0,5338 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$	$R^2 = 0,9743$
<i>Goupia glabra</i>	$\rho_{U\%} = \frac{0,802}{1 - 0,3303 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$	$R^2 = 0,8306$
<i>Eucalyptus citriodora</i>	$\rho_{U\%} = \frac{0,957}{1 - 0,1321 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$	$R^2 = 0,9325$
<i>Hymenaea stilbocarpa</i>	$\rho_{U\%} = \frac{1,035}{1 - 0,0945 \cdot \left(\frac{U\% - 12}{100}\right)}$	$R^2 = 0,8130$

* A regressão foi feita para o intervalo de umidade $10\% \leq U\% \leq 20\%$, entretanto parece bem ajustada ao restante do intervalo. Para umidade acima do ponto de saturação das fibras não se ajustou uma curva aos resultados, apenas se apresentou a tendência da curva anterior. Nas expressões, $U\%$ deve estar em % e $\rho_{U\%}$ em g/cm^3 .

6.1.6 Resumo dos resultados

A fim de fornecer uma visão do conjunto dos resultados, com o intuito de aferir o coeficiente fornecido pela NBR 7190/97, apresenta-se na Tabela 11 um resumo dos coeficientes obtidos nas diversas regressões, bem como algumas médias que deverão ser testadas para aferição do modelo.

Tabela 11 - Resumo dos coeficientes obtidos nas regressões

ESPÉCIES (NOME CIENTÍFICO)	Resistência			Médias	Rigidez	Densidade
	f_{c0}	f_{t0}	f_{v0}	α	E_{c0}	ρ
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i>	3,7417	2,400	2,9159	3,0192	1,5327	-0,6300
<i>Pinus elliottii</i>	3,6339	2,2861	2,7657	2,8952	2,1859	-0,5835
<i>Pinus taeda</i>	3,3670	2,1762	2,5997	2,7143	2,5614	-0,5340
Médias (Coníferas)	3,5809	2,2874	2,7604	2,8762	2,0933	-0,5825
Valor aproximado	3,5	2,5	3,0	3,0	2,0	-0,6
<i>Eucalyptus grandis</i>	3,4026	2,2397	3,0512	2,8978	2,1779	-0,5338
<i>Goupia glabra</i>	3,3618	2,3846	2,5692	2,7719	2,7697	-0,3303
<i>Eucalyptus citriodora</i>	3,2169	2,0740	2,5384	2,6098	2,8058	-0,1321
<i>Hymenaea stilbocarpa</i>	3,1542	2,0266	2,4079	2,5296	2,8416	-0,0945
Médias (Dicotiledôneas)	3,2839	2,1812	2,6417	2,7023	2,6488	-0,2727
Valor aproximado	3,0	2,0	2,5	2,5	2,5	-0,3
Médias (Geral)	3,4112	2,2267	2,6926	2,7768	2,4107	-0,4055
Valor aproximado	3,5	2,0	2,5	3,0	2,5	-0,4

6.2 Testes de Tukey

A aferição de um modelo consiste em verificar se os resultados produzidos por ele são equivalentes aos obtidos experimentalmente. No caso deve-se verificar se os valores de uma determinada propriedade, de resistência, rigidez ou densidade, corrigida por um determinado modelo para o teor de umidade de 12% é equivalente a seu valor obtido experimentalmente.

Para cada propriedade foram obtidos alguns resultados, com umidade no intervalo $10\% \leq U\% \leq 20\%$, que podem ser corrigidos, por um determinado modelo, para o teor de umidade de 12%. Portanto, deve-se verificar se em média estes resultados são equivalentes aos experimentais. O teste de Tukey, de comparação de múltiplas médias, permite fazer esta verificação usando simultaneamente vários modelos.

Assim, para as propriedades de resistência, foi aplicado o teste de Tukey utilizando os tratamentos apresentados na Tabela 12.

Para o estudo do módulo de elasticidade foi aplicado o teste de Tukey utilizando os tratamentos apresentados na Tabela 13.

Para a densidade aparente foram utilizados os tratamentos da Tabela 14.

Após a aplicação dos testes de Tukey foi possível identificar os tratamentos que fornecem resultados equivalentes aos experimentais, como se apresenta nas Tabelas 15, 16 e 17.

Tabela 12 - Tratamentos utilizados no teste de Tukey para o estudo de cada propriedade de resistência

TRATAMENTO	DEFINIÇÃO
1	O valor de f_{12} estimado a partir dos resultados experimentais, por interpolação linear de dois resultados com umidade próxima de 12% (testemunho).
2	O valor de f_{12} obtido, através de regressão linear simples, para a propriedade e espécie em questão. Ou seja, um coeficiente α para cada propriedade de resistência de cada espécie (por exemplo, para a resistência à compressão paralela do <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i> , conforme a Tabela 11, tem-se $\alpha = 3,7417$).
3	O valor de f_{12} obtido através da eq. (11), utilizando para o coeficiente α um valor médio para a espécie (ou classe de resistência) de dicotiledônea (ou conífera), fixada a propriedade de resistência em questão. Ou seja, um coeficiente α para cada propriedade de resistência, mas separando dicotiledôneas de coníferas (por exemplo, para a resistência à compressão paralela do <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i> , conforme a Tabela 11, tem-se $\alpha = 3,5809$).
4	O valor de f_{12} obtido através da eq. (11), utilizando para o coeficiente α um valor médio para todas as propriedades de resistência da mesma espécie (ou classe de resistência) de dicotiledônea (ou conífera). Ou seja, um coeficiente α único para as propriedades de resistência de cada espécie (por exemplo, para qualquer propriedade de resistência, conforme a Tabela 11 usar-se-ia, para o <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i> , $\alpha = 3,0192$).
5	O valor de f_{12} obtido através da eq. (11), utilizando para o coeficiente α um valor médio para todas as propriedades de resistência de todas as espécies (ou classes de resistência) das dicotiledôneas (ou coníferas). Ou seja, um coeficiente α único para as propriedade de resistência, mas separando dicotiledôneas de coníferas (por exemplo, para qualquer propriedade de resistência, conforme a Tabela 11 usar-se-ia, para qualquer conífera, $\alpha = 2,8762$).
6	O valor de f_{12} obtido através da eq. (11), utilizando para o coeficiente α um valor médio para todas as espécies (ou classes de resistência) de dicotiledônea (ou conífera), fixada a propriedade de resistência em questão. Ou seja um coeficiente α único para cada propriedade de resistência, independentemente da espécie (por exemplo, para a resistência à compressão paralela, conforme a Tabela 11 usar-se-ia, para qualquer espécie, $\alpha = 3,4112$).
7	O valor de f_{12} obtido através da eq. (11), utilizando para o coeficiente α um valor médio para todas as propriedades de resistência de todas as espécies (ou classes de resistência). Ou seja um coeficiente α único, independentemente da propriedade de resistência e da espécie (por exemplo, para qualquer propriedade de resistência, conforme a Tabela 11 usar-se-ia, para qualquer espécie, $\alpha = 2,7768$).
8	Proposta da NBR 7190/97, com $\alpha = 3$.

Tabela 13 - Tratamentos utilizados no teste de Tukey para o estudo do módulo de elasticidade longitudinal

TRATAMENTO	DEFINIÇÃO
1	O valor de E_{12} estimado a partir dos resultados experimentais, por interpolação linear de dois resultados com umidade próxima de 12% (testemunho).
2	O valor de E_{12} obtido, através de regressão linear simples, utilizando o modelo da eq. (11), para a espécie em questão. Ou seja, um coeficiente α para cada espécie (por exemplo, para o <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i> , conforme a Tabela 11, tem-se $\alpha = 1,5327$).
3	O valor de E_{12} obtido através da eq. (11), utilizando para o coeficiente α um valor médio para as dicotiledôneas (ou conífera). Ou seja, um coeficiente α para as dicotiledôneas e outro para as coníferas (por exemplo, para o <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i> , que é conífera, conforme a Tabela 11, tem-se $\alpha = 2,0933$).
4	O valor de E_{12} obtido através da eq. (11), utilizando para o coeficiente α um valor médio para todas as espécies. Ou seja um coeficiente α único, independentemente da espécie (por exemplo, para qualquer espécie, conforme a Tabela 11, usar-se-ia $\alpha = 2,4107$).
5	Proposta da NBR 7190/97, com $\alpha = 2$.

OBS.: Na eq. (11), evidentemente, substituiu-se f_{12} e $f_{U\%}$ por E_{12} e $E_{U\%}$.

Tabela 14 - Tratamentos utilizados no teste de Tukey para o estudo da densidade aparente

TRATAMENTO	DEFINIÇÃO
1	O valor de ρ_{12} estimado a partir dos resultados experimentais, por interpolação linear de dois resultados com umidade próxima de 12% (testemunho).
2	O valor de ρ_{12} obtido, através de regressão linear simples, com o modelo da eq. (11), para a espécie em questão. Ou seja, um coeficiente α para cada espécie (por exemplo, para o <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i> , conforme a Tabela 11, tem-se $\alpha = -0,6300$).
3	O valor de ρ_{12} obtido através da eq. (05).
4	O valor de ρ_{12} obtido através da eq. (06).
5	O valor de ρ_{12} obtido através da eq. (11), utilizando para o coeficiente α um valor médio para as dicotiledôneas (ou conífera). Ou seja, um coeficiente α para as dicotiledôneas e outro para as coníferas (por exemplo, para o <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i> , que é conífera, conforme a Tabela 11, tem-se $\alpha = -0,5825$).
6	O valor de ρ_{12} obtido através da eq. (11), utilizando para o coeficiente α um valor médio para todas as espécies. Ou seja um coeficiente α único, independentemente da espécie (por exemplo, para qualquer espécie usar-se-ia, conforme a Tabela 11, $\alpha = -0,4055$).

OBS.: Na eq. (11), evidentemente, substituiu-se f_{12} e $f_{U\%}$ por ρ_{12} e $\rho_{U\%}$.

Tabela 15 - Tratamentos estatisticamente equivalentes aos resultados experimentais (Propriedades de resistência)

PROPRIEDADE	ESPÉCIE (NOME CIENTÍFICO)	TRATAMENTOS							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0})	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i>	X	X	X	X	X	X	X	X
	<i>Pinus elliottii</i>	X	X	X	X	X	X		X
	<i>Pinus taeda</i>	X	X	X	X	X	X	X	X
	<i>Eucalipto grandis</i>	X	X	X	X	X	X	X	X
	<i>Goupia glabra</i>	X	X	X	X	X	X	X	X
	<i>Eucalipto citriodora</i>	X	X	X	X	X	X	X	X
	<i>Hymenaea stilbocarpa</i>	X	X	X			X	X	X
Resistência à tração paralela às fibras (f_{t0})	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i>	X	X	X			X	X	
	<i>Pinus elliottii</i>	X	X	X	X	X	X	X	X
	<i>Pinus taeda</i>	X	X	X	X	X	X	X	
	<i>Eucalipto grandis</i>	X	X	X		X	X		
	<i>Goupia glabra</i>	X	X	X	X	X	X	X	
	<i>Eucalipto citriodora</i>	X	X	X	X	X	X	X	X
	<i>Hymenaea stilbocarpa</i>	X	X	X	X	X	X	X	X
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, plano radial-longitudinal (f_{v0})	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i>	X	X	X	X	X	X	X	X
	<i>Pinus elliottii</i>	X	X	X	X	X	X	X	X
	<i>Pinus taeda</i>	X	X	X	X	X	X	X	X
	<i>Eucalipto grandis</i>	X	X	X	X	X	X	X	X
	<i>Goupia glabra</i>	X	X	X	X	X	X	X	X
	<i>Eucalipto citriodora</i>	X	X	X	X	X	X	X	
	<i>Hymenaea stilbocarpa</i>	X	X	X	X	X	X	X	X

OBS.: Os tratamentos 3 e 6 são equivalentes aos tratamentos 1 e 2, que correspondem aos resultados experimentais, para todas as propriedades de resistência. O tratamento 8, adotado pela NBR 7190/97, é válido para a resistência à compressão paralela, mas não fornece resultados estatisticamente equivalentes, em algumas das espécies estudadas, aos experimentais nos casos de tração paralela ou cisalhamento.

Tabela 16 - Tratamentos estatisticamente equivalentes aos resultados experimentais (Módulo de elasticidade longitudinal)

PROPRIEDADE	ESPÉCIE (NOME CIENTÍFICO)	TRATAMENTOS				
		1	2	3	4	5
Módulo de elasticidade longitudinal (E_{c0})	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i>	X	X	X	X	X
	<i>Pinus elliottii</i>	X	X	X	X	X
	<i>Pinus taeda</i>	X	X	X	X	X
	<i>Eucalipto grandis</i>	X	X	X	X	X
	<i>Goupia glabra</i>	X	X	X	X	X
	<i>Eucalipto citriodora</i>	X	X	X	X	
	<i>Hymenaea stilbocarpa</i>	X	X	X	X	

OBS.: Para o módulo de elasticidade longitudinal, os tratamentos 3 e 4 são equivalentes aos tratamentos 1 e 2, que correspondem aos resultados experimentais. O tratamento 5, adotado pela NBR 7190/97, não fornece resultados equivalentes, em algumas das espécies estudadas, aos experimentais.

Para reportar uma propriedade de resistência ou de rigidez, ao teor de umidade de 12%, percebe-se observando as Tabelas 15 e 16, pode-se utilizar: um

coeficiente de correção, α , único (valor médio) para cada propriedade, independentemente da espécie (tratamento 6, para as propriedades de resistência, e 4 para o módulo de elasticidade); ou, um coeficiente de correção, α , único (valor médio) para cada propriedade, mas separando coníferas de dicotiledôneas (tratamento 3, nos dois casos). Evidentemente, aplicando este coeficiente na expressão da eq. (11) e, no caso do módulo de elasticidade, substituindo f_{12} e $f_{U\%}$ por E_{12} e $E_{U\%}$.

Os valores do coeficiente de correção, α , validados até o momento, são os valores médios constantes na Tabela 11. Estes valores são de difícil memorização e em consequência pouco práticos para o meio técnico. Por este motivo foram refeitos os testes de Tukey utilizando os valores aproximados destes coeficientes, também apresentados na Tabela 11. Os resultados obtidos, nestes testes, também validam os coeficientes aproximados.

Um estudo do erro relativo, em relação aos valores experimentais, da utilização destes dois modelos, com coeficientes aproximados, mostrou uma distribuição muito semelhante, com erros máximos de 5,80% (separando coníferas de dicotiledôneas) e 5,40% (sem separar as espécies).

Tabela 17 - Tratamentos estatisticamente equivalentes aos resultados experimentais (Densidade aparente)

PROPRIEDADE	ESPÉCIE (NOME CIENTÍFICO)	TRATAMENTOS					
		1	2	3	4	5	6
Densidade aparente (ρ)	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i>	X	X	X	X	X	X
	<i>Pinus elliottii</i>	X	X		X	X	
	<i>Pinus taeda</i>	X	X	X	X	X	X
	<i>Eucalipto grandis</i>	X	X		X		X
	<i>Goupia glabra</i>	X	X	X	X	X	X
	<i>Eucalipto citriodora</i>	X	X		X	X	X
	<i>Hymenaea stilbocarpa</i>	X	X		X	X	X

OBS.: Para a densidade aparente, apenas o tratamento 4 é equivalente aos tratamentos 1 e 2, que correspondem aos resultados experimentais. Os outros tratamentos não são equivalentes aos resultados experimentais em algumas das espécies estudadas.

Percebe-se, ao observar a Tabela 17, apenas a validade do tratamento 4, indicando que para reportar a densidade aparente, ao teor de umidade de 12%, pode-se utilizar a expressão da eq. (06).

7 CONCLUSÕES

Os resultados mostram que o modelo de regressão, que deu origem à proposta da NBR 7190/97, para reportar as propriedades de resistência e rigidez ao teor de umidade de 12%, se ajusta bem aos resultados experimentais, mas fornece resultados ligeiramente diferentes dos coeficientes adotados pela norma.

O modelo proposto, para reportar as propriedades de resistência ao teor de umidade de referência, pela NBR 7190/97, é bastante razoável para a correção da resistência à compressão paralela às fibras e foi validado para as sete espécies

estudadas, apesar disto o coeficiente adotado pela norma é uma aproximação grosseira do valor médio encontrado e pode ser melhorado. Para as outras propriedades de resistência, entretanto, este modelo não se mostrou válido: para a resistência à tração paralela às fibras, o modelo forneceu resultados estatisticamente diferentes dos experimentais em quatro das sete espécies estudadas; para a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, no plano radial-longitudinal, o modelo forneceu resultados estatisticamente diferentes dos experimentais em uma das sete espécies estudadas.

O modelo proposto, para reportar as propriedades de rigidez ao teor de umidade de referência, pela NBR 7190/97, também não foi validado. Para o módulo de elasticidade longitudinal, este modelo, forneceu resultados estatisticamente diferentes dos experimentais em duas das sete espécies estudadas.

Por outro lado, os resultados mostram, que pode-se utilizar expressão semelhante à proposta pela NBR 7190/97, mas com coeficientes diferentes para cada propriedade de resistência ou rigidez. Ou seja, a correção de uma propriedade de resistência, para o teor de umidade de 12%, pode ser feita utilizando-se a seguinte expressão:

$$f_{12} = f_{U\%} \cdot \left[1 + \frac{\alpha \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (14)$$

Onde:

f_{12} = resistência, à determinada solicitação, a um teor de umidade de 12%;

$f_{U\%}$ = resistência, à determinada solicitação, a um teor de umidade de U%;

U% = teor de umidade da madeira, em %, e

α = coeficiente de correção, fornecido na Tabela 18.

Já, a correção do módulo de elasticidade longitudinal, para o teor de umidade de 12%, pode ser feita utilizando-se a seguinte expressão:

$$E_{12} = E_{U\%} \cdot \left[1 + \frac{\alpha \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (15)$$

Onde:

E_{12} = módulo de elasticidade longitudinal, a um teor de umidade de 12%;

$E_{U\%}$ = módulo de elasticidade longitudinal, a um teor de umidade de U%;

U% = teor de umidade da madeira, em %, e

α = coeficiente de correção, fornecido na Tabela 18.

Tabela 18 - Valores do coeficiente de correção, α

PROPRIEDADE DE RESISTÊNCIA OU RIGIDEZ	COEFICIENTE DE CORREÇÃO, α
Resistência à compressão paralela às fibras, f_{c0}	3,5
Resistência à tração paralela às fibras, f_{t0}	2,0
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, f_{v0}	2,5
Módulo de elasticidade longitudinal, E_{c0}	2,5

Os resultados mostram que, para corrigir a densidade aparente ao teor de umidade de referência, pode-se utilizar a seguinte expressão:

$$\rho_{12} = \rho_{U\%} + \rho_{U\%} \left[(1 - \delta_v) \cdot \frac{(12 - U\%)}{100} \right], \text{ com } \delta_v = \frac{\Delta V}{V_{U\%}} \text{ e } \Delta V = \frac{V_{U\%} - V_{seca}}{V_{seca}} \cdot 100 \quad (16)$$

Onde:

ρ_{12} = densidade aparente ao teor de umidade de 12%;

$\rho_{U\%}$ = densidade aparente ao teor de umidade U%;

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

δ_v = coeficiente de retratibilidade volumétrica;

ΔV = retração volumétrica, para a variação de umidade entre U% e 0%;

$V_{U\%}$ = volume, do corpo de prova, ao teor de umidade U%, e

V_{seca} = volume, do corpo de prova, para a madeira seca U=0%.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980). **NBR 6230 - Ensaio físicos e mecânicos de madeiras**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). **NBR 7190 - Cálculo e Execução de estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). **NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeiras**. Rio de Janeiro.

BETTS, H. S. (1919). **Timber, its strength, seasoning and grading**. New York. 31p.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. (1992). **Mechanics of wood and wood composites**. New York, Van Nostrand Reinhold Company. 712p.

BROCHARD, F. X. (1960). **Bois et charpente em bois (Le matériau et son utilisation)**. Collection de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics. Paris. Éditions Eyrolles.

DESLANDES, F.; VANDENBERGHE, L. (1959). **Le bois (Caractéristiques-usinage utilisations diverses)**. Paris, Editions Eyrolles.

DRAPER, N.; SMITH, H. (1981). **Applied regression analysis**. 2.ed. New York, John Wiley & Sons.

FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A.; TOLEDO, G. L. (1976). **Estatística aplicada**. São Paulo, Atlas.

GOMES, F. P. (1982). **Curso de estatística experimental**. 10.ed. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

GREEN, D. W.; EVANS, J. W.; PELLERIN, R. (1991). Moisture content and the flexural properties of lumber: species differences. In: INTERNATIONAL TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, London. **Proceedings**. London, England.

- HELLMEISTER, J. C. (1983). Madeiras e suas características. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1., São Carlos, SP. 1983. **Anais: características**. São Carlos, USP-EESC-SET-LaMEM.
- KARLSEN, G. G.; BOLSHAKOV, V. V.; KAGAN, M. Y.; SVENTSITSKY, G. V.; ALEKSANDROVSKY, K. V.; BOCHKARYOV, I. V.; FOLOMIN, A. I. (1967). **Wooden structures**. Moscow, Mir Publishers. 638p.
- KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. (1984). **Principles of wood science and technology**. vol. I - Solid wood. Berlin, Springer-Verlag, 1968-1984./Reprint/
- KRECH, H. (1960). **Größe und zeitlicher Ablauf von Kraft und Durchbiegung beim Schlagbiegeversuch na Holz und ihr Zusammenhang mit der Bruchschlagarbeit**.
- LAHR, F. A. R. (1983). **Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira**. São Carlos. 216p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- LIMA, J. T.; DELLA LUCIA, R. M.; VITAL, B. R. (1986). Influência do teor de umidade nas propriedades mecânicas de *Eucalyptus saligna*. **Revista Árvore**, v.10, n.1, p.27-43.
- LOGSDON, N. B. (1992). Estudo comparativo sobre a maneira de obter a densidade aparente a 12% de umidade. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4, São Carlos, SP. 1992. **Anais**. São Carlos, LaMEM/EESC/USP. v. 4, p. 31-42.
- LOGSDON, N. B. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira**. São Carlos. 174p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MADSEN, B. (1992). **Structural behaviour of timber**. North Vancouver, British Columbia, Canada, Timber Engineering Ltd.