

Influência do ângulo entre a força e as fibras da madeira na resistência à tração

Norman Barros Logsdon^{1*} Zenésio Finger¹ José Manoel Henriques de Jesus²

¹ Departamento de Engenharia Florestal, Faculdade de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367, Boa Esperança, 78060-900, Cuiabá-MT, Brasil.

² Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367, Boa Esperança, 78060-900, Cuiabá-MT, Brasil.

* Author for correspondence: logsdon@terra.com.br

Received: 10 September 2013 / Accepted: 30 August 2014 / Published: 27 September 2014

Resumo

A madeira é um material anisotrópico e suas características de resistência variam com o ângulo entre o esforço e a direção das fibras (α). A norma brasileira, NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1997), prevê a correção da resistência às tensões normais, sempre que $\alpha \geq 6^\circ$, e recomenda aplicar a expressão de Hankinson aos valores de cálculo. Entretanto, não há comprovação experimental sobre a validade de utilizar esta expressão em valores de cálculo. Foram objetivos deste trabalho: levantar na bibliografia outras expressões utilizadas; e, verificar a validade destas expressões, inclusive em valores característicos, para representar a variação das resistências à tração, com o ângulo α . De uma amostra, formada por doze pranchas, foram retirados, e ensaiados conforme a NBR 7190, corpos de prova de tração, com diferentes inclinações das fibras. Quatro modelos (Hankinson, Senos, Karlsen e Keylwerth) foram avaliados, utilizando-se os testes de “pairing” e dos desvios, o que melhor representou o fenômeno foi o de Keylwerth.

Palavras-chave: Resistência à tração; Resistência característica; Inclinação das fibras.

Influence of the angle between the force and the wood's grain on its tension strength

Abstract

Wood is an anisotropic material and its strength varies with the angle between the force and the grain direction (α). The Brazilian Code, NBR 7190 - Timber Structures Design, from Brazilian Association of Technical Codes - ABNT (1997), foresees the strength correction to the normal stress whenever $\alpha \geq 6^\circ$, and recommends applying Hankinson's expression to obtain design values. However, there is no experimental evidence on the validity of using this expression on design values. The objectives of this study were: to research the literature for other expressions used; and, to verify the validity of these expressions, including to characteristic values, to represent the variation of the tension strength with the α angle. From a sample, formed by twelve boards, tension specimens were sawed and tested in agreement with NBR 7190, with different grain directions. Four models (Hankinson, Sin, Karlsen and Keylwerth) were evaluated, using the pairing and residues tests. The model that best represented the phenomenon was Keylwerth's.

Key words: Tension strength; Characteristic strength; Grain inclination.

Introdução

A atual norma brasileira, NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira, da Associação Brasileira de Normas

Técnicas – ABNT (1997), prevê a correção da resistência de cálculo, para verificação de tensões normais inclinadas, sempre que o ângulo entre o esforço e a direção das fibras for superior a 6° , e recomenda, para esta correção, a aplicação da expressão de Hankinson. O projeto de revisão da NBR 7190 da ABNT (2011), aprovado e aguardando publicação, não prevê alteração nesta postura.

Vários autores estudaram a influência do ângulo entre a força e as fibras da madeira sobre sua resistência e estabeleceram modelos empíricos ou teóricos. Entre os modelos empíricos, segundo Kollmann e Côté Jr. (1984), o proposto por Hankinson, apresentado na Equação 1, com expoente $n = 2$, tem sido o mais utilizado. Karlsen et al. (1967), por outro lado, recomendam o modelo apresentado na Equação 2, com expoente $n = 3$. Um estudo teórico, desenvolvido por Szücs (1992), propõe a Equação 3, com o expoente $n = 2$. A norma alemã DIN-1052 - *Holzbaugerichte, Berechnung und Ausführung, da Deutsche Industrie Normen* – DIN (1969), adota esta expressão com o expoente $n = 1$. Keylwerth, segundo Kollmann e Côté Jr. (1984), também desenvolveu uma expressão teórica, de expoente $n = 2$, mas para a variação do módulo de elasticidade, que pode ser colocada sob a forma da Equação 4 para as resistências. Alguns autores indicam expoentes diferentes, na aplicação das Equações 1 a 4, conforme o tipo de solicitação em análise ou para diferentes teores de umidade da madeira.

Outros critérios, como o de Tsai e Wu (1971), desenvolvidos para materiais anisotrópicos, não serão avaliados, neste trabalho, pelas seguintes razões: 1) Alguns dos parâmetros usados nesses critérios não são corriqueiramente obtidos na caracterização física e mecânica de madeiras, o que tornaria necessário rever ou ampliar sobremaneira os ensaios utilizados com este fim; 2) O exagerado número de parâmetros utilizados nesses critérios (são 27 no critério citado), praticamente obriga a admitir hipóteses simplificadoras, como fizeram Nicolas et al. (2008), que dificilmente serão verificadas.

Todos os estudos, encontrados na bibliografia, apontam para a variação em um indivíduo (ou para a média dos resultados obtidos em diferentes indivíduos), mas a aplicação em projetos de estruturas de madeira utiliza-se de valores de cálculo de resistências, que se originam de valores característicos. Desta forma, torna-se necessário avaliar como variam valores característicos de resistência (associados à parcela menos resistente da madeira), quando se varia o ângulo entre o esforço aplicado e a direção das fibras.

O objetivo deste trabalho foi verificar qual a influência que o ângulo entre o esforço aplicado e a direção das fibras exerce sobre a resistência à tração da madeira e, especialmente, sobre sua resistência característica à tração.

$$f_{\alpha} = \frac{f_0 \cdot f_{90}}{f_0 \cdot \text{sen}^n \alpha + f_{90} \cdot \text{cos}^n \alpha} \quad (1)$$

$$f_{\alpha} = \frac{f_0}{1 + \left(\frac{f_0}{f_{90}} - 1\right) \cdot \text{sen}^n \alpha} \quad (2)$$

$$f_{\alpha} = f_0 - (f_0 - f_{90}) \cdot \text{sen}^n \alpha \quad (3)$$

$$f_{\alpha} = \frac{f_0}{\left(\text{cos}^n \alpha - \frac{f_0}{f_{90}} \text{sen}^n \alpha\right) \cdot \text{cos}(2\alpha) + \frac{f_0}{f_{45}} \text{sen}^n \alpha} \quad (4)$$

Onde:

f_{α}, f_0, f_{45} e f_{90} = Resistências, a uma tensão normal inclinada em relação às fibras da madeira, de um ângulo α , de 0° (paralela às fibras), de 45° e de 90° (normal às fibras), respectivamente.

Material e métodos

Os corpos de prova para os ensaios foram retirados de um lote formado por três árvores. De cada árvore foram retiradas quatro pranchas, na direção radial-longitudinal, totalizando 12 pranchas. De cada prancha foram retirados os corpos de prova como se apresenta na Figura 1. Desta

forma, cada inclinação contou com 12 corpos de prova, totalizando 132 corpos de prova de tração ($0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ e 90°). O material não utilizado foi identificado e armazenado de modo a permitir refazer qualquer corpo de prova, cujo resultado de ensaio apresentasse anomalia.

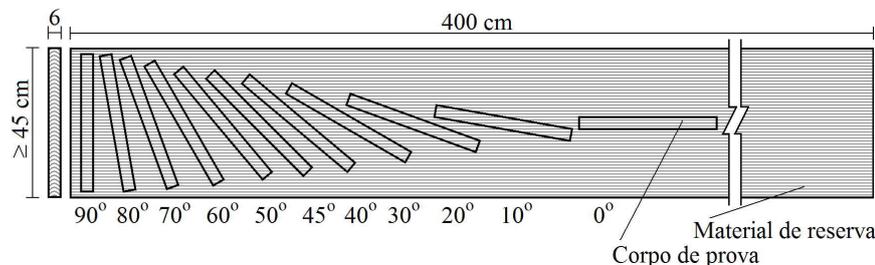


Figura 1. Retirada dos corpos de prova de uma prancha.

Utilizou-se a espécie *Aspidosmerma populifolium* A. DC., conhecida por Peroba-mica, por ser encontrada com diâmetros, a altura do peito (1,30 m da acima da linha de afloramento junto ao solo), acima de 1,00 m e estar sendo explorada comercialmente. O material foi coletado no município de Cotriguaçu-MT.

A espécie *Aspidosmerma populifolium*, pertence à família APOCYNACEAE, distribui-se naturalmente na região amazônica e no Centro-Oeste do Brasil, nos estados do Amazonas, Pará, Rondônia e Mato Grosso. Ocorre principalmente nas florestas ombrófilas densas e abertas, submontanas, dificilmente ultrapassa 30 m de altura, podendo alcançar até 75 cm de diâmetro. Apresenta fuste alto e muito cilíndrico, com a copa geralmente concentrada ao ápice da árvore; a ramificação é cimosa e a copa é aberta e capitata umbeliforme. Suas folhas são simples, alternas, com exsudação leitosa pegajosa na abscisão foliar. Sua casca é profundamente fissurada e corticosa, com ritidoma pardo a acastanhado, de deiscência granular. A madeira dessa espécie é densa ($\rho_{ap,12\%} \cong 0,73 \text{ g/cm}^3$); com cerne

marrom-acastanhado claro, com veios mais escuros, sendo pouco distinto do albúneo que geralmente é mais claro; escurece em exposição ao ar, lisa ao tato e recebe acabamento opaco a pouco lustroso; textura fina; grã ondulada; cheiro indistinto e gosto amargo, resistente ao ataque de fungos e xilófagos. Floresce de agosto a setembro e frutifica de novembro a dezembro. Sua madeira é muito utilizada na construção civil como vigas, caibros e ripas, para pisos e na indústria de carpete de madeira como lâmina de capa, na fabricação de móveis de qualidade superior, em acabamento de interiores, e para fabricação de portas e batentes

(Logsdon et al. 2008). Foi providenciada uma secagem da madeira ao ar, a fim de estabilizar a madeira a um teor de umidade próximo de 12%, com o intuito de minimizar erros ao reportar os resultados dos ensaios ao teor de umidade de referência.

Inicialmente a madeira foi desdobrada, em peças maiores que os corpos de prova, com seção de aproximadamente 6 cm x 6 cm, conforme o esquema da Figura 1. As peças foram identificadas e colocadas para secar ao ar, protegida das intempéries, até que a massa das peças de uma amostra de controle, composta por três peças (uma de cada árvore), apresentassem, simultaneamente, constância de massa (variação inferior a 0,5%) entre duas leituras sucessivas, no intervalo de um dia. Em seguida essas peças foram desdobradas em corpos de prova. Este procedimento minimizou a ocorrência de deformações, dos corpos de prova, por variação do teor de umidade.

Os ensaios de tração, dos quais foram obtidas as resistências à tração, foram realizados em corpos de prova de dimensões 2 cm x 5 cm x 45 cm (com redução da seção, nos 21 cm do trecho central, para 0,7 cm x 5 cm), com as direções das fibras bem definidas, utilizando a metodologia descrita na NBR 7190, da ABNT (1997), para o ensaio de tração paralela às fibras. A massa de cada corpo de prova (uma das “metades”) foi avaliada logo após o ensaio e após a secagem em estufa, a fim de obter a umidade no instante do ensaio, possibilitando reportar o resultado ao teor de umidade de referência de 12%.

Assim, foi possível obter: a tensão de ruptura (Equação 5) e o teor de umidade dos corpos de prova no instante do ensaio (Equação 6).

$$f_{i\alpha} = \frac{F_{i\alpha, \max}}{A} \quad (5)$$

$$U = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100\% \quad (6)$$

Onde:

- A = Área da seção transversal, do trecho central do corpo de prova, mm²;
 $F_{i\alpha, \max}$ = Máxima força de tração aplicada ao corpo de prova (carga de ruptura), N;
 $f_{i\alpha}$ = Resistência à tração inclinada, de um ângulo α , em relação às fibras, MPa;
 m_0 = Massa do corpo de prova, seco em estufa, g;
 m_u = Massa do corpo de prova, no instante do ensaio, g;
 U = Teor de umidade do corpo de prova, no instante do ensaio, %.

Para reportar os resultados ao teor de umidade de referência foi utilizada a equação aferida por Logsdon (1998), apresentada na Equação 7, já com a notação adequada ao caso.

$$f_{i\alpha, 12} = f_{i\alpha, U} \left[1 + \frac{2,0(U - 12)}{100} \right] \quad (7)$$

Onde:

- $f_{i\alpha, 12}$ = Resistência à tração inclinada de um ângulo α , ao teor de umidade de referência de 12%, MPa;
 $f_{i\alpha, U}$ = Resistência à tração inclinada de um ângulo α , ao teor de umidade U , MPa;
 U = Teor de umidade do corpo de prova, no instante do ensaio, %.

$$x_{wm} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (8)$$

$$x_{wk} = \text{Máximo} \left\{ x_1; 0,7 \cdot x_{wm} e \left(2 \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2}-1} - x_{\frac{n}{2}} \right) \right\} \quad (9)$$

Onde:

- n = Número de corpos de prova ensaiados (tamanho da amostra);
 x = Variável estudada, característica em questão;
 x_i = Elemento i da variável x , os valores x_i são ordenados crescentemente, de modo que x_1 é o menor valor da amostra;
 x_{wk} = Operador para o valor característico da resistência;
 x_{wm} = Estimativa da média da característica em questão (variável x).

Para a análise estatística, de cada prancha (ou variável utilizada na avaliação das resistências de cálculo), preparouse uma planilha eletrônica, na qual os resultados foram pareados aos valores calculados com os modelos, onde o expoente n podia ser alterado. Destes pares de valores foram obtidos os desvios ($d = f_{\text{experimental}} - f_{\text{modelo}}$) e o diagrama dos desvios ($d \times \alpha$). O valor do expoente n foi sistematicamente alterado (com incrementos de 0,01) até obter o intervalo em que o valor de n atendesse, simultaneamente, o teste de “pairing” e o teste dos desvios.

Resultados e discussão

Os ensaios de tração forneceram os valores, já corrigidos para a umidade de 12%, das resistências (tensões de ruptura) à tração inclinada da Tabela 1. A partir desses resultados foram obtidos os valores das variáveis, utilizadas na

Todos os modelos, apresentados na revisão bibliográfica, para representar a variação da resistência com o ângulo entre o esforço aplicado e a direção das fibras, são dependentes de pelo menos dois valores experimentais, a resistência na direção paralela às fibras ($\alpha = 0^\circ$) e na direção normal às fibras ($\alpha = 90^\circ$). Assim, uma eventual falha na avaliação desses valores, por má condução do ensaio ou pela existência de algum defeito localizado na madeira, que não foi percebido, comprometeria a avaliação do modelo. Para minimizar erros na avaliação dos modelos, decidiu-se refazer todo ensaio cujo resultado destoasse de seus pares.

Dos 12 corpos de prova com a mesma direção das fibras (um de cada prancha) foram obtidos os valores médios (Equação 8) e os valores característicos (Equação 9) como estão definidos na atual NBR 7190, da ABNT (1997). Para avaliação dos modelos foram utilizados dois instrumentos estatísticos: o teste de “pairing”, que avalia se os desvios entre os resultados de ensaio e os obtidos pelo modelo têm média nula; e o teste dos desvios, que avalia se estes desvios não apresentam tendenciosidade ao longo do domínio.

Para avaliar a variação das resistências com o ângulo entre o esforço aplicado e a direção das fibras da madeira, estudou-se o comportamento dos resultados obtidos em cada prancha e, em seguida, verificou-se a existência de um comportamento comum às 12 pranchas. Para avaliar a variação das resistências de cálculo com o ângulo entre o esforço aplicado e a direção das fibras, foram estudados os comportamentos das variáveis que compõem o modelo da NBR 7190, da ABNT (1997), e o modelo final proposto por essa norma. Foram utilizados os modelos apresentados nas Equações 1 a 4.

avaliação das resistências de cálculo, apresentados na Tabela 2.

Aplicando o teste de “pairing” e o teste dos desvios, na comparação dos resultados dos de ensaios (Tabela 1) aos modelos apresentados nas Equações 1 a 4, foram obtidos, para cada prancha, os limites do intervalo do expoente n com validade estatística, bem como o valor do expoente n que produz o melhor ajuste de cada modelo. Os resultados obtidos indicam:

- A validade da Expressão de Hankinson (Equação 1), desde que o expoente n esteja no intervalo $2,23 \leq n \leq 2,52$. O expoente que fornece melhor ajuste é $n = 2,35$. O valor tradicionalmente utilizado, recomendado pela NBR 7190, da ABNT (1997), de $n = 2$, não tem validade estatística.

- A validade da Expressão dos senos (Equação 3), desde que o expoente n esteja no intervalo $0,24 \leq n \leq 0,41$. O expoente que fornece melhor ajuste é $n = 0,37$. O valor tradicionalmente utilizado pela norma alemã DIN-1052, da DIN (1969), de $n = 1$, não tem validade estatística. Esse modelo também não tem validade com $n = 2$, da proposta de Szücs (1992).
- A validade da Expressão apresentada por Karlsen (Equação 2), desde que o expoente n esteja no intervalo $2,25 \leq n \leq 2,96$. O expoente que fornece melhor ajuste é $n = 2,36$. O valor tradicionalmente utilizado, recomendado por Karlsen et al. (1967), de $n = 3$, não tem validade estatística.
- A Expressão de Keylwerth (Equação 4) tem validade estatística para n no intervalo $1,91 \leq n \leq 2,51$. O expoente que fornece melhor ajuste é $n = 2,37$. O valor tradicionalmente utilizado, recomendado por Kollmann e Côté Jr. (1984), de $n = 2$, também tem validade estatística. Esse foi o único modelo que apresentou validade com o expoente com o qual foi originalmente apresentado.

Tabela 1. Resistências obtidas nos ensaios de tração de cada prancha.

Prancha	Valores das resistências (tensão de ruptura) à tração inclinada, em MPa, nas seguintes inclinações α :										
	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	90°
A1	30,30	16,94	10,11	5,38	3,08	2,81	2,57	2,11	2,13	1,96	1,84
A2	25,83	14,65	9,35	6,82	4,12	3,07	2,10	1,50	1,32	1,28	1,02
B1	48,54	32,12	18,40	9,08	6,63	6,15	4,46	3,83	3,63	3,06	2,46
B2	47,62	29,93	16,72	9,56	8,13	6,29	4,60	3,94	3,54	2,97	2,29
C1	35,62	22,75	13,62	6,90	4,15	3,62	3,08	2,68	2,51	2,05	1,89
C2	35,68	23,18	15,52	10,96	6,37	5,34	4,54	2,84	1,93	1,83	1,14
D1	51,37	32,94	19,97	11,07	5,63	5,01	5,17	4,47	3,85	3,49	2,08
D2	53,43	31,24	19,06	10,97	8,67	7,32	6,32	6,06	4,78	4,34	2,50
E1	47,88	34,79	21,59	10,16	6,33	3,62	3,63	2,97	2,83	2,56	2,16
E2	53,96	29,43	14,49	10,27	6,03	3,50	3,45	2,74	2,59	2,40	1,94
F1	36,20	24,72	14,78	11,20	6,65	5,15	3,83	3,26	2,41	2,22	1,82
F2	35,88	25,44	16,75	11,80	8,61	6,41	4,65	2,98	2,46	1,31	0,99

Tabela 2. Valores das variáveis utilizadas para avaliar a variação das resistências de cálculo à tração.

Variável	Valores das variáveis utilizadas para avaliar a resistência de cálculo, em MPa, nas seguintes inclinações α :										
	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	90°
$f_{t,1}^{(1)}$	25,83	14,65	9,35	5,38	3,08	2,81	2,10	1,50	1,32	1,28	0,99
$f_{t,m}^{(2)}$	41,86	26,51	15,86	9,51	6,20	4,86	4,03	3,28	2,83	2,46	1,84
$z_b^{(3)}$	29,12	15,46	9,42	4,94	2,87	1,64	2,10	1,78	1,59	1,15	0,83
$f_{t,k}^{(4)}$	32,04	18,58	11,10	6,66	4,34	3,40	2,82	2,30	1,98	1,72	1,29

(¹) menor resistência, obtida nas 12 pranchas, para cada inclinação; (²) média das resistências;

$$z_b = \left(\frac{f_{t,1} + f_{t,2} + \dots + f_{t,\frac{n}{2}-1}}{2} - f_{t,\frac{n}{2}} \right); \quad \text{Máximo} \left\{ f_{t,1}; 0,7 \cdot f_{t,m} \text{ e } f_{t,k} = \left(\frac{f_{t,1} + f_{t,2} + \dots + f_{t,\frac{n}{2}-1}}{2} - f_{t,\frac{n}{2}} \right) 1,1 \right\}$$

Aplicando o teste de “pairing” e o teste dos desvios, na comparação dos resultados obtidos na Tabela 2 aos modelos apresentados nas Equações 1 a 4, foram obtidos, para cada variável avaliada, os limites do intervalo do expoente n com validade estatística, bem como o valor do expoente n que produz o melhor ajuste de cada modelo. Os resultados obtidos indicam:

- A validade da Expressão de Hankinson (Equação 1), desde que o expoente n esteja no intervalo $2,17 \leq n \leq 2,64$. O expoente que fornece melhor ajuste é $n = 2,37$. O valor tradicionalmente utilizado, pela NBR 7190 da ABNT (1997), de $n = 2$, não tem validade estatística. Em geral, esse modelo, subestima os valores de resistência, portanto, é de aplicação segura para o projeto de estruturas.
- A validade da Expressão dos senos (Equação 3), desde que o expoente n esteja no intervalo $0,18 \leq n \leq 0,37$. O expoente que fornece melhor ajuste é $n =$

0,33. O valor tradicionalmente utilizado pela norma alemã DIN-1052, da DIN (1969), de $n = 1$, não tem validade estatística. Este modelo também não tem validade com $n = 2$ da proposta de Szücs (1992).

- A validade da Expressão apresentada por Karlsen (Equação 2), desde que o expoente n esteja no intervalo $2,18 \leq n \leq 2,92$. O expoente que fornece melhor ajuste é $n = 2,40$. O valor tradicionalmente utilizado, recomendado por Karlsen et al. (1984), de $n = 3$, não tem validade estatística.
- A Expressão de Keylwerth (Equação 4) tem validade estatística para n no intervalo $1,86 \leq n \leq 2,64$. O expoente que fornece melhor ajuste é $n = 2,53$. O valor tradicionalmente utilizado, recomendado por Kollmann e Côté Jr. (1984), de $n = 2$, também tem validade estatística. Também para valores característicos, este foi o único modelo que apresentou validade com o expoente com o qual foi originalmente apresentado.

Na Figura 3 apresenta-se o ajuste dos modelos avaliados, ao estimador da resistência característica definido na NBR 7190, da ABNT (1997), usando o expoente tradicionalmente utilizado. Dessa figura percebe-se que apenas o modelo proposto por Keylwerth (Equação 4) foi estatisticamente ajustado. O modelo de Hankinson, embora apresente resultados aproximados, não se mostrou estatisticamente válido, pois sempre subestima valores.

Na Figura 4 apresenta-se o ajuste dos modelos avaliados, ao estimador da resistência característica definido na NBR 7190, da ABNT (1997), usando o melhor expoente para cada modelo. Nesta figura percebe-se que todos os modelos podem ser estatisticamente ajustados, desde que se utilize o expoente adequado.

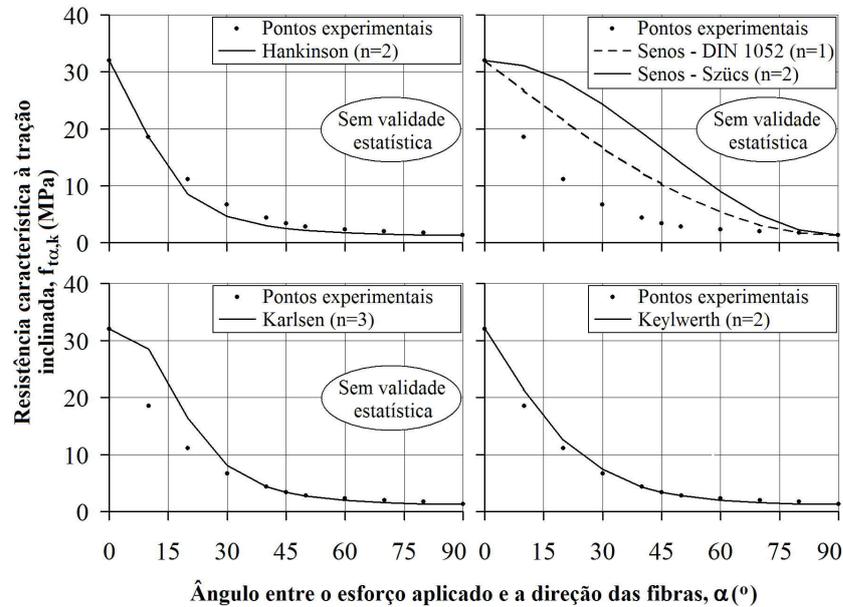


Figura 3. Ajuste dos diversos modelos, com os expoentes tradicionalmente utilizados, aos pontos experimentais correspondentes à resistência característica à tração obtida com o estimador proposto pela NBR 7190, da ABNT (1997).

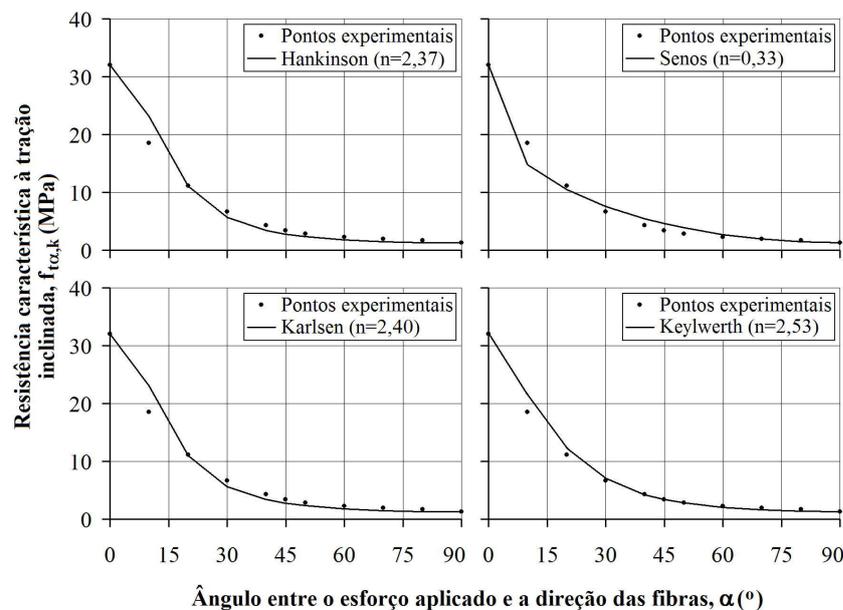


Figura 4. Ajuste dos diversos modelos, com os expoentes que fornecem melhores ajustes, aos pontos experimentais correspondentes à resistência característica à tração obtida com o estimador proposto pela NBR 7190, da ABNT (1997).

Conclusões

Dos modelos encontrados na literatura (Equações 1 a 4), apenas o modelo de Keylwerth (Equação 4) foi considerado estatisticamente válido em seu formato original, tanto para explicar o comportamento individual, o médio, ou da porção mais fraca do material (valor característico). Por outro lado, para a aplicação desse modelo é necessário o conhecimento da resistência para a inclinação de 45°, cujo ensaio não é previsto na atual norma brasileira.

Os outros modelos avaliados, especialmente os de Hankinson (Equação 1) e Karlsen (Equação 2), com o expoente adequado, também fornecem bom ajuste. Entretanto, estes modelos são muito sensíveis à alteração do expoente, portanto, obter um expoente estatisticamente aceitável para todas as espécies (ou tipos de solicitação) pode ser tarefa impraticável.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo financiamento do projeto de pesquisa que deu origem a este trabalho.

Referências

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997) *NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeiras*. Rio de Janeiro: ABNT. 107p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011) *Projeto de revisão da NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeiras*. Rio de Janeiro: ABNT. 75p.
- Deutsche Industrie Normen (1969) *DIN-1052 – Holbauwerke, Berechnung und Ausführung*. Berlin: DIN. 132p.
- Karlsen GG, Bolshakov VV, Kagan MY, Svetsitsky GV, Aleksandrovsky KV, Bochkaryov IV, Folomin AI (1967) *Wooden structures*. Moscow: Mir Publishers. 638p.
- Kollmann FFP, Côté JR, WA (1984) *Principles of wood science and technology*. vol. I Solid Wood. Reprint. New York: Springer-Verlag. 592p.
- Logsdon NB (1998) *Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira*. Tese, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 174p.
- Logsdon NB, Finger Z, Borges CGA (2008) Caracterização físico-mecânica da madeira de peroba-mica, *Aspidosperma populifolium* A. DC. (APOCYNACEAE). *Floresta*, 38(1):11-21.
- Nicolas AN, Mascia NT, Todeschini R (2008) Comparação entre o critério de Tsai-Wu e a fórmula de Hankinson na tração da madeira. *Madeira: Arquitetura e Engenharia*, 23:13-29.
- Szücs CA (1983) Estudo do comportamento da madeira a esforços inclinados. In: *Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira*, São Carlos, SP.
- Tsai SW, WU EM (1971) A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials*, 5(1):58-80. doi: 10.1177/002199837100500106