

Avaliação dos estimadores da resistência
característica à compressão paralela às fibrasEvaluation of the estimators of the characteristic
strength to compression parallel to the grainNorman Barros Logsdon¹, José Manoel Henriques de Jesus² e José Eduardo Penna³**Resumo**

O objetivo desse trabalho foi estudar a Função Densidade de Probabilidade por Amostragem da Resistência Característica à Compressão Paralela às Fibras, para aferir o modelo adotado pela atual norma brasileira (NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira), para estimar a resistência característica. Foram utilizados todos os corpos-de-prova, isentos de defeitos, possíveis de serem extraídos de uma única prancha de madeira, da espécie ANGELIM-PEDRA, *Dinizia excelsa* Ducke. Assim, obteve-se um lote homogêneo (admitido na NBR 7190) e uma amostra de tamanho suficiente (no caso 100 corpos-de-prova). O método de ensaio de compressão utilizado foi o descrito na referida norma. Com os resultados dos 100 corpos-de-prova (“população”), foi possível obter o valor da resistência característica (quantil de 5%). Desse universo (“população”), foram retiradas 100 amostras aleatórias, de 12 exemplares, das quais foram estimadas as resistências características, utilizando os estimadores em avaliação. As resistências características, das 100 amostras, possibilitaram a construção da distribuição por amostragem do valor característico (para cada estimador), cuja média é uma estimativa justa do valor característico da “população”. Ajustando-se o valor obtido a partir da distribuição por amostragem (média da distribuição) ao do universo dos dados (quantil de 5%) foi possível aferir os estimadores fornecidos pela NBR 7190, cujos modelos forneceram estimativas ligeiramente altas necessitando correção.

Palavras-chave: resistência característica, compressão, estimadores.

Abstract

The objective of this work was to study the Probability Density Function by Sampling of Characteristic Strength to Compression Parallel to the Grain, to review the model adopted by the current Brazilian Code (NBR 7190 – Timber Structures Design) to estimate the characteristic strength. Every specimen, free of defects, that was possible to be sawed from a single board of wood, of the species Angelim-Pedra, *Dinizia excelsa* Ducke, were used. Thus, a homogeneous lot (admitted by NBR 7190) and a sufficiently-sized sample (in this case 100 specimens) were obtained. The compression test method used was that described in NBR 7190. With the results of the 100 specimens (“population”), it was possible to obtain the value of the characteristic strength (5% quintile). From a universe of 100 results (“population”), 100 aleatory samples, of 12 individuals each, were obtained. For each sample the characteristic compression strength was estimated using the studied models. The characteristic strengths of these 100 samples allowed the construction of the distribution by sampling of the characteristic value (for each studied model), whose average is a fair estimation of the characteristic value of the “population.” The value obtained from the distribution by sampling (average of the distribution), was adjusted to that obtained for the universe of the data (5% quintile). In this way, it was possible to measure the estimators supplied by NBR 7190, whose models were slightly higher estimates requiring correction.

Keywords: characteristic strength, compression, estimators.

¹Doutor em Engenharia de Estruturas e Professor Associado da UFMT – Universidade Federal de Mato Grosso – Faculdade de Engenharia Florestal – Departamento de Engenharia Florestal – Av. Fernando Corrêa da Costa s/n – Cuiabá, MT – 78060-900 – E-mail: logsdon@terra.com.br

²Doutor em Engenharia de Materiais e Professor Associado da UFMT – Universidade Federal de Mato Grosso – Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil – Av. Fernando Corrêa da Costa s/n – Cuiabá, MT – 78060-900 – E-mail: jmhenriques@terra.com.br

³Doutor em Ciências Florestais e Professor Associado da UFMT – Universidade Federal de Mato Grosso – Faculdade de Engenharia Florestal – Departamento de Engenharia Florestal – Av. Fernando Corrêa da Costa s/n – Cuiabá, MT – 78060-900 – E-mail: jose.penna@terra.com.br

INTRODUÇÃO

A verificação de segurança no método dos estados limites prevê que as solicitações de cálculo não superem as correspondentes resistências de cálculo. A resistência de cálculo, a determinada solicitação, pode ser obtida a partir da resistência característica, que é estimada a partir de resultados de ensaios devidamente normalizados.

De modo geral, admite-se que as resistências dos materiais tenham distribuições normais. O valor representativo básico adotado é a chamada resistência característica inferior, correspondente ao quantil de 5% da distribuição de resistências (FUSCO, 1977). Desse modo, pode-se escrever a Equação 1.

$$f_k = f_m (1 - 1,645\delta) \quad (1)$$

Onde: f_k é a resistência característica; f_m é a resistência média; e, δ é o coeficiente de variação das resistências.

A experiência na investigação experimental de materiais estruturais mostra que em lotes homogêneos o coeficiente de variação δ dificilmente atinge a 15% (FREITAS, 1978). No caso das madeiras, segundo a NBR 7190 da ABNT (1997), quando não se conhecem valores experimentais efetivos, a favor da segurança, admite-se o valor extremo $\delta=18\%$, resultando o valor pessimista de resistência dado pela Equação 2.

$$f_k = f_m (1 - 1,645 \times 0,18) = 0,70 f_m \quad (2)$$

Entretanto, a NBR 7190 da ABNT (1997), apresenta paradoxos com relação ao δ adotado para os diferentes tipos de solicitações. No item 6.3.3 da referida norma, para as resistências a esforços normais admite-se um coeficiente de variação de 18% e para as resistências a esforços tangenciais um coeficiente de variação de 28%. Porém, como forma de obtenção dos resultados dos ensaios, o δ adotado equivale a 18%, independente do tipo de solicitação, isso pode ser verificado nos anexos F13 e B3 da referida norma.

Para as espécies pouco conhecidas, exige-se a determinação direta da resistência característica da madeira (f_k) por meio do ensaio de amostras com $n \geq 12$ exemplares, dos quais se obtêm os valores de ruptura (f_1, f_2, \dots, f_n). A partir destes resultados, determina-se a resistência característica pela Equação 3 (ABNT, 1997).

$$f_k = \left(2 \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{n/2-1} + f_n}{n/2 - 1} - f_n \right) / 2 \cdot 1,1$$

sendo $f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_n$ (3)

A função de estimação definida pela expressão entre parênteses, na Equação 3, fornece estimativas centradas, isto é, estimativas cuja média coincide com a resistência característica efetiva do lote examinado. Para evitar que 50% das estimativas sejam feitas por valores abaixo da verdadeira resistência característica, a NBR 7190, da ABNT (1997), torna o estimador razoavelmente excêntrico, multiplicando por "1,1" esta expressão (FUSCO, 1977). A NBR 7190, da ABNT (1997), recomenda ainda, que se empregue a mesma função de estimação acima apresentada, não se considerando, porém para f_k valor menor que o do corpo-de-prova menos resistente (f_1), nem menor que 70% do valor médio ($0,7 \cdot f_m$). A restrição de não se tomar valor inferior a f_1 decorre do fato de que o menor resultado da amostra já é uma estimativa pessimista de f_k , e que só é empregada quando há mistura descontrolada de materiais diferentes (ABNT, 1997).

Em resumo, pode-se dizer que a NBR 7190, da ABNT (1997), utiliza para definir o valor característico da resistência (f_k) o maior de três valores: 70% do valor médio das resistências obtidas na amostra ensaiada ($0,70 \cdot f_m$); a menor resistência obtida na amostra ensaiada (f_1); e o resultado do operador descrito na Equação 3.

A origem desses estimadores, na ordem apresentada, são as seguintes: 1) distribuição normal, com coeficiente de variação (δ) das resistências superestimado, segundo Freitas (1978), em $\delta = 18\%$, como se mostra na Equação 2; 2) o estimador z_a , apresentado na Equação 4, que tem uma distribuição de extremos com a mediana centrada no valor característico, segundo Fusco (1976), e cujo coeficiente k_a , admitido igual a unidade pelos autores da NBR 7190, da ABNT (1997), tem a finalidade de centrar a distribuição no valor mínimo $x_{i,\min}$; 3) o estimador z_b , apresentado na Equação 5, que tem uma distribuição de extremos praticamente centrada no valor característico (FUSCO, 1976), multiplicado por "1,1", o que o torna razoavelmente excêntrico, para evitar que 50% das estimativas sejam feitas por valores abaixo da verdadeira resistência característica (FUSCO, 1977).

$$z_a = k_a \cdot x_{i,\min}$$

de uma amostra de n valores x_1, x_2, \dots, x_n (4)

$$z_b = 2 \left(\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{m-1}}{m-1} \right) \cdot x_m$$

de uma amostra de $2m$ valores x_1, x_2, \dots, x_{2m} (5)

Nas quais: z_a é o estimador de uma distribuição de extremos com mediana centrada no quantil de 5%; k_a é um coeficiente de ajuste; $x_{i,\min}$ é o valor mínimo de uma amostra de n valores x_1, x_2, \dots, x_n ; z_b é o estimador de outra distribuição de extremos centrada no quantil de 5%; e, x_m é o valor médio de uma amostra de $2m$ elementos x_1, x_2, \dots, x_{2m} .

Deve-se ressaltar que a referida norma adota valores e conceitos que podem não condizer com a realidade, ou não ser regra única para todas as solicitações. Por exemplo: 1) O coeficiente "1,1", adotado pela NBR 7190, da ABNT (1997), para corrigir pequenas excentricidades, é o mesmo para todas as solicitações? É adequado? 2) A distribuição de resistências é normal? O coeficiente de variação das resistências é único para todas as solicitações? É adequado admitir 18%? Dessa forma, pode ser necessário aferir ou alterar o modelo para estimar a resistência característica da madeira, às diferentes solicitações.

Nesse contexto se enquadra o presente trabalho que pretende discutir, com base experimental, alguns dos parâmetros adotados pela NBR 7190, da ABNT (1997), para obter, a partir de ensaios, a resistência característica da madeira. O trabalho limitar-se-á a questão da resistência característica à compressão paralela às fibras. Assim, o objetivo do presente trabalho é aferir o modelo para estimar a resistência característica à compressão paralela às fibras e, se necessário, sugerir um modelo mais adequado.

MATERIAIS E MÉTODOS

Buscou-se um lote homogêneo, limitado a 12m^3 , para a "população", a fim de garantir a homogeneidade admitida pela NBR 7190, da ABNT (1997), que possibilitou aos autores da norma admitir distribuição normal de resistências. Isso foi conseguido utilizando-se uma única prancha, extraída de uma árvore de ANGELIM-PEDRA, *Dinizia excelsa* Ducke, coletada no município de Brasnorte - MT. A "população" consistiu de todos os corpos-de-prova, para o ensaio de compressão paralela, possíveis de serem extraídos da referida prancha, no caso 100 corpos-de-prova, isentos de alburno, medula e outros defeitos da madeira.

O material foi coletado a partir de uma tora, com 45cm de diâmetro e 250cm de comprimento (dimensões aproximadas). Dessa tora foi serrada, aleatoriamente, uma prancha diametral,

de direções principais bem definidas, da qual os corpos-de-prova foram retirados. Da referida prancha foram descartadas as regiões contendo alburno e medula e, a madeira restante foi desdobrada em barras de seção aproximada 6cm x 6cm, das quais foram serrados os corpos-de-prova, de dimensões 5cm x 5cm x 15cm, isentos de defeitos e no maior número possível.

Para realização dos ensaios de compressão foi utilizada a metodologia descrita na norma NBR 7190 da ABNT (1997). Antes dos ensaios, os corpos-de-prova foram condicionados, em sala climatizada, para que a madeira adquirisse um teor de umidade próximo de 12% propício aos ensaios. Os corpos-de-prova foram considerados climatizados quando a variação da massa dos corpos-de-prova começou a oscilar em torno de zero. Em seguida, tomou-se o cuidado de avaliar a massa úmida do corpo-de-prova (m_U), no instante do ensaio (imediatamente após), e a correspondente massa seca (m_0) após a secagem em estufa, a fim de obter o teor de umidade (base seca) do corpo-de-prova no instante do ensaio, com o intuito de reportar os resultados à umidade de referência.

Nesses procedimentos foram utilizados: uma máquina universal de ensaios, com capacidade de carga de 200kN, que permitia o controle da velocidade de carregamento de 10MPa/min; uma sala de climatização, que mantinha a temperatura em $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ e a umidade relativa do ar em $(65 \pm 5)\%$; um paquímetro digital, com sensibilidade de 0,01mm; uma balança analítica, com sensibilidade de 0,01g; e uma estufa de esterilização e secagem, que mantinha a temperatura em $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$.

A resistência à compressão paralela às fibras foi reportada ao teor de umidade de referência utilizando a proposta de Logsdon (1998), apresentada na Equação 6.

$$f_{c0,12} = f_{c0,U} \cdot \left[1 + \frac{3,5 \cdot (U-12)}{100} \right] \quad (6)$$

Onde: $f_{c0,12}$ é a resistência à compressão paralela às fibras ao teor de umidade de 12%; $f_{c0,U}$ é a resistência à compressão paralela às fibras ao teor de umidade (U, em %) no instante do ensaio.

Com os resultados dos 100 corpos-de-prova ("população"), foi obtido o valor da resistência característica (quantil de 5%) sob hipótese de distribuição normal.

Desse universo de 100 resultados ("população"), foram retiradas 100 amostras aleatórias,

de 12 exemplares (amostra mínima prevista na NBR 7190), das quais foram estimadas as resistências características, utilizando os estimadores a serem aferidos. As resistências características, das 100 amostras aleatórias, possibilitaram a construção da distribuição por amostragem do valor característico, que por definição terá por média uma estimativa justa do valor característico do universo dos dados (“população”). A distribuição por amostragem do valor característico foi construída para cada estimador a ser aferido. Ajustando-se o valor característico, obtido a partir da distribuição por amostragem do valor característico (média da distribuição), ao obtido para o universo dos dados (quantil de 5%) foi possível aferir os estimadores em estudo.

Da “população” e da distribuição por amostragem do valor característico, para cada estimador, foi verificada inicialmente a normalidade dos resultados, por meio dos testes propostos por Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov, utilizando o programa “Sisvar” (FERREIRA, 2000).

Os estimadores utilizados foram: 1) o estimador oriundo da distribuição normal, apresentado anteriormente na Equação 1, utilizado pela NBR 7190, da ABNT (1997), sob a forma da Equação 2, ao admitir para as resistências um coeficiente de variação máximo de $\delta = 18\%$; 2) o estimador z_a , apresentado na Equação 4, utilizado pela NBR 7190, da ABNT (1997), sob a forma $f_k = f_1$ (menor resistência da amostra), ao admitir $k_a = 1$, compatível com as hipóteses de $n \geq 12$ e $\delta = 18\%$, e 3) o estimador z_b , apresentado na Equação 5, utilizado pela NBR 7190, da ABNT (1997), com a majoração de 10% a fim de tornar o operador razoavelmente excêntrico, para evitar que 50% das estimativas sejam feitas por valores abaixo da verdadeira resistência característica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizados os ensaios de compressão, foram obtidos os valores de resistência à compressão paralela às fibras, já corrigidos para o teor de umidade de referência, apresentados na Tabela 1.

A análise estatística dos resultados apresentados na Tabela 1, utilizando o Programa “Sisvar”, permitiu obter para a distribuição de resistências à compressão paralela às fibras, da “população”, o seguinte: média aritmética amostral, $f_{c0,m} = 61,28 \text{ MPa}$; coeficiente de variação, $\delta = 7,32\%$; resistência característica da população (quantil de 5%), $f_{c0,k} = 53,90 \text{ MPa}$ (admitindo normalidade da distribuição); teste de normalidade de Shapiro-Wilk, $W = 0,9704$ e $pr < W = 0,0239$; teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, $D = 0,0581$ e $pr < D = 0,8784$; o histograma e o polígono de frequências apresentados na Figura 1.

Os testes de normalidade mostram-se conflitantes. O teste de Shapiro-Wilk, embora apresente $W \approx 1$ (que indica bom ajuste entre os dados e a curva de regressão) não atinge o nível de significância desejado de 5% ($pr < W < 0,05$ ou 5%), dados que sugerem decidir pela não normalidade. Já o teste de Kolmogorov-Smirnov fornece $D \approx 0$ (que indica distâncias mínimas entre a curva dos dados e a da distribuição normal) e nível de significância superior ao desejado ($pr < D \geq 0,05$ ou 5%), resultados que sugerem decidir pela normalidade dos dados.

O teste de Shapiro-Wilk tem sido considerado melhor que o de Kolmogorov-Smirnov, que é mais tolerante (robusto), assim deve-se decidir pela não normalidade da distribuição das resistências à compressão paralela às fibras. Por outro lado, o resultado conflitante indica que a distribuição das resistências à compressão paralela às fibras se aproxima muito da distribuição normal.

Tabela 1. Resistência à compressão paralela às fibras, $f_{c0,12}$ (MPa), dos corpos-de-prova da “população” (valores reportados ao teor de umidade de 12%).

Table 1. Strength to compression parallel to the grain, $f_{c0,12}$ (MPa), of the specimens of the “population” (values reported to the moisture content of 12%).

CP*	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-----	60,98	63,95	64,16	65,38	62,70	57,57	58,46	63,82	68,85
10	52,92	63,90	62,85	59,19	60,87	62,41	54,23	62,92	61,94	66,44
20	56,39	63,75	52,80	62,60	63,06	59,94	61,49	63,62	66,90	65,33
30	55,51	66,52	57,52	65,38	65,97	64,30	64,95	59,60	64,39	62,88
40	66,51	60,14	66,51	61,47	65,34	62,20	62,10	61,40	51,75	58,35
50	61,74	66,04	59,63	59,41	58,10	70,62	64,72	62,99	43,35	69,03
60	58,46	59,82	68,05	57,16	64,40	67,40	59,74	55,26	60,19	62,66
70	60,78	58,08	51,71	58,42	60,49	64,09	55,09	64,57	66,53	63,78
80	58,24	58,95	62,26	63,89	58,32	57,13	62,23	57,22	57,10	57,56
90	57,94	60,00	58,03	62,02	57,86	56,38	56,38	70,28	67,13	58,21
100	66,73									

* A soma dos valores das primeiras linha e coluna indicam o corpo-de-prova (CP).

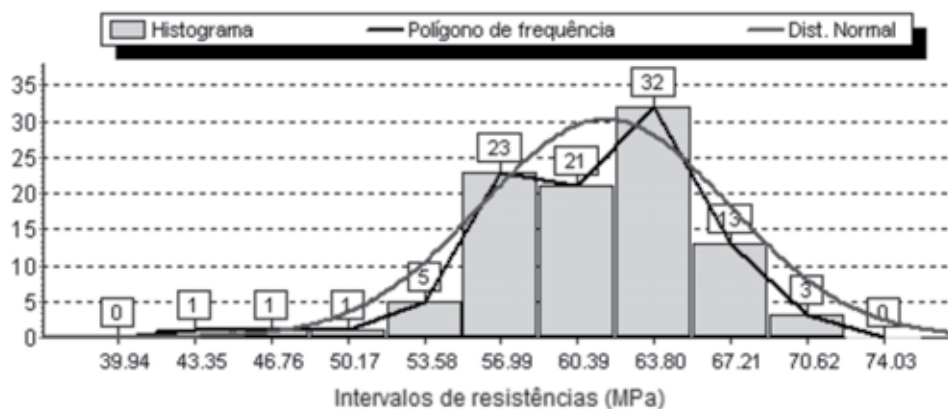


Figura 1. Histograma e polígono de frequências da “população”.
Figure 1. Histogram and polygon of the frequencies to the “population”.

Utilizando-se da função percentil, disponível no aplicativo de planilha eletrônica Excel, que considera apenas a amostra, independentemente da distribuição, obteve-se, para a “população”, o percentil a 5% de $f_{c0,k}=54,17\text{MPa}$.

Observa-se que o cálculo do valor característico utilizando-se os dados da amostra ($f_{c0,k}=54,17\text{MPa}$) é ligeiramente superior àquela obtido sob hipótese de distribuição normal ($f_{c0,k}=53,90\text{MPa}$). Esse fato mostra que, embora a distribuição de resistências não seja normal, a hipótese de distribuição normal conduz a uma estimativa segura da resistência característica à compressão paralela às fibras, pois a subestima.

O estimador oriundo da distribuição normal $f_k=f_m \cdot (1-1,645 \cdot \delta)$, exceto por uma questão de escala, tem o mesmo comportamento da distribuição por amostragem da média. Assim, inicialmente estudou-se essa distribuição. Para isso foram retiradas, dos dados da Tabela 1, 100 amostras aleatórias de 12 corpos-de-prova e calculadas, para cada uma destas amostras, uma estimativa do valor médio da resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c0,m}$), obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 2.

A análise estatística dos resultados apresentados na Tabela 2, utilizando o Programa “Sisvar”, permite obter para a distribuição por amostragem das médias da resistência à compressão paralela às fibras o seguinte: média aritmética amostral, $f_{c0,m}=61,52\text{MPa}$; coeficiente de variação, $\delta=2,14\%$; teste de normalidade de Shapiro-Wilk, $W=0,9892$ e $pr<W=0,5965$; teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, $D=0,0664$ e $pr<D=0,7567$; o histograma e o polígono de frequências da Figura 2.

Os dois testes de normalidade sugerem decidir pela normalidade dos dados ($W \cong 1$, $pr<W > 5\%$ e $D \cong 0$, $pr<D > 5\%$).

Por definição o valor médio da distribuição por amostragem da média das resistências à compressão paralela às fibras ($f_{c0,m}=61,52\text{MPa}$) é a média da resistência à compressão paralela às fibras da “população” ($f_{c0,m}=61,28\text{MPa}$). Como era esperado, a distribuição por amostragem da média das resistências à compressão paralela às fibras é uma distribuição normal e tem por média uma estimativa justa da média da distribuição de resistências à compressão paralela às fibras da “população”.

Tabela 2. Resistência média, de cada amostra, à compressão paralela às fibras, $f_{c0,m}$ (MPa).
Table 2. Average strength, of each sample, to compression parallel to the grain, $f_{c0,m}$ (MPa).

Am*	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-----	62,50	59,54	63,90	60,29	64,72	62,32	62,87	62,55	62,51
10	60,37	61,67	60,77	63,03	61,72	61,68	62,09	61,98	62,59	63,34
20	61,33	59,12	63,22	61,31	62,70	61,43	62,72	60,78	61,53	61,51
30	58,36	61,25	61,15	58,37	61,34	62,08	62,26	61,93	61,05	60,60
40	59,96	60,21	61,97	59,38	63,04	61,65	59,16	60,16	61,65	62,79
50	60,40	59,91	62,94	61,77	61,94	62,18	62,96	63,56	60,83	63,02
60	60,71	61,91	61,69	61,07	61,52	63,90	59,37	60,17	61,00	62,07
70	60,75	63,10	62,71	61,00	61,80	58,53	60,96	60,27	62,97	61,95
80	59,78	63,05	60,01	62,05	62,08	60,44	59,91	63,98	60,12	63,03
90	61,74	59,26	62,35	60,89	60,90	61,64	61,88	62,06	60,77	61,41
100	63,25									

* A soma dos valores da primeira linha e da primeira coluna indicam a amostra (Am).

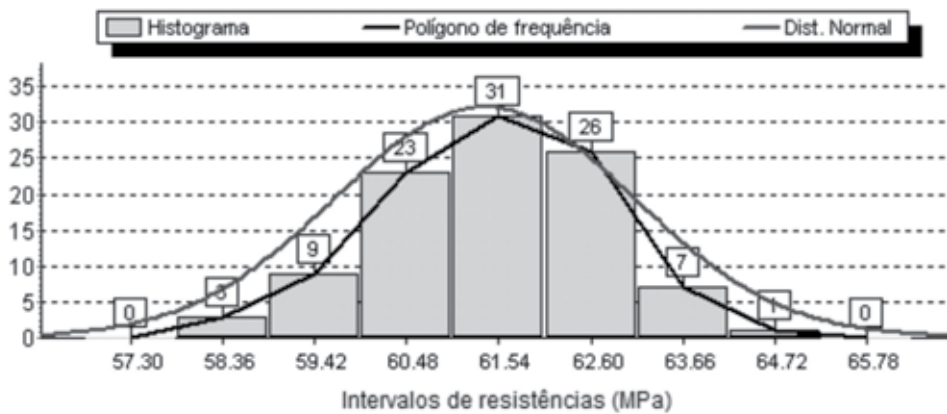


Figura 2. Histograma e polígono de frequência das resistências médias à compressão paralela às fibras, de amostras com 12 corpos-de-prova.

Figure 2. Histogram and polygon of frequency of the average strengths to compression parallel to the grain, of samples with 12 specimens.

A partir do valor médio da distribuição por amostragem da média, $f_{c0,m} = 61,52 \text{ MPa}$ (estimativa justa da média da “população”), e aceitando a hipótese de normalidade da “população” (aproximação a favor da segurança) com coeficiente de variação de $\delta = 7,32\%$ (avaliado para a “população”), pode-se obter o valor característico por meio do estimador oriundo da distribuição normal, como se apresenta na Equação 7.

$$f_k = f_m \cdot (1 - 1,645 \cdot \delta) = 61,52 \cdot (1 - 1,645 \cdot 0,0732) = 54,11 \text{ MPa} \quad (7)$$

Observa-se que o resultado obtido a partir das amostras ($f_{c0,k} = 54,11 \text{ MPa}$), pode ser considerado uma estimativa justa do valor característico obtido para a “população” ($f_{c0,k} = 53,90 \text{ MPa}$).

A partir dos resultados de ensaios de compressão paralela às fibras, obtidos sob a égide da NBR 7190, da ABNT (1997), pelo Grupo de Pesquisas em Madeiras e Estruturas de Madeira (GPMEM-UFMT), foram obtidos alguns dados estatísticos

da distribuição dos coeficientes de variação, apresentados a seguir: média aritmética amostral do coeficiente de variação, $\delta_{\text{médio}} = 10,72\%$; coeficiente de variação máximo, $\delta_{\text{máx}} = 17,89\%$; percentil de 95% do coeficiente de variação, $\delta_{95\%} = 17,29\%$.

Esses dados indicam que a utilização de um coeficiente de variação de 18%, como um limite superior do coeficiente de variação das resistências, parece ser adequado para a compressão paralela às fibras.

O estimador baseado no estimador z_a , sob a forma $f_{c0,k} = k_a \cdot f_{c0,\text{min}}$, exceto por uma questão de escala, tem o mesmo comportamento da distribuição por amostragem do valor mínimo da amostra $f_{c0,\text{min}} = f_1$. Assim, inicialmente estudou-se esta distribuição. Para isto foram retiradas, dos dados da Tabela 1, 100 amostras aleatórias de 12 corpos-de-prova e obtidos, para cada uma destas amostras, o valor mínimo da resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c0,\text{min}}$), obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resistências características à compressão paralela às fibras, estimadas por $f_{c0,k} = f_{c0,\text{min}}$ (MPa), de amostras com 12 corpos-de-prova.

Table 3. Characteristic strength to compression parallel to the grain, estimated by $f_{c0,k} = f_{c0,\text{min}}$ (MPa), of samples with 12 specimens.

Am*	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-----	54,23	51,75	54,23	54,23	59,41	57,10	55,51	57,10	43,35
10	52,80	51,75	54,23	57,56	57,56	55,09	56,38	55,09	57,10	51,75
20	57,52	43,35	55,26	52,80	55,09	55,09	56,38	55,09	43,35	55,09
30	51,71	51,71	52,80	43,35	56,38	55,26	55,09	57,22	43,35	55,09
40	43,35	43,35	57,22	43,35	55,26	57,22	43,35	43,35	57,10	56,38
50	56,38	52,80	58,03	57,10	51,75	55,26	57,13	57,10	43,35	57,10
60	56,38	58,08	54,23	55,26	43,35	57,22	43,35	43,35	51,75	58,21
70	43,35	51,75	58,21	52,80	55,26	43,35	43,35	43,35	51,75	57,13
80	56,38	56,38	51,71	55,09	57,56	51,71	43,35	58,08	51,75	55,26
90	57,52	43,35	56,38	55,26	43,35	55,09	57,10	56,38	52,80	52,80
100	57,22									

* A soma dos valores da primeira linha e da primeira coluna indicam a amostra (Am).

A análise estatística dos resultados apresentados na Tabela 3, utilizando o Programa "Sisvar", permite obter para a distribuição por amostragem das resistências características à compressão paralela às fibras, utilizando o estimador baseado no estimador z_a , sob a forma $f_{c0,k} = f_{c0,min}$, o seguinte: média aritmética amostral, $f_{c0,k} = 52,79$ MPa; coeficiente de variação, $\delta = 9,92\%$; teste de normalidade de Shapiro-Wilk, $W = 0,7825$ e $pr < W = 0,0000$; teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, $D = 0,2196$ e $pr < D = 0,0001$; o histograma e o polígono de freqüências da Figura 3.

Os dois testes de normalidade sugerem decidir pela não normalidade dos dados ($W \neq 1$, $pr < W < 5\%$ e $D \neq 0$, $pr < D < 5\%$).

Por definição o valor médio da distribuição por amostragem das resistências características à compressão paralela às fibras é a resistência característica à compressão paralela às fibras da "população". No caso do estimador baseado no estimador z_a , sob a forma $f_{c0,k} = f_{c0,min}$,

obteve-se um valor ligeiramente subestimado ($f_{c0,k} = 52,79$ MPa) da resistência característica à compressão paralela às fibras da "população" ($f_{c0,k} = 53,90$ MPa). Estes resultados sugerem a utilização de um coeficiente (k_a) ligeiramente superior à unidade. No caso, o valor apresentado na Equação 8.

$$k_a = \frac{f_{vk, população}}{f_{vk, estimado}} = \frac{53,90}{52,79} \cong 1,0210 \cong 1 \quad (8)$$

O estimador z_b , sob a forma $f_{c0,k} = \{2 \cdot [(f_{c0,1} + f_{c0,2} + \dots + f_{c0,n/2-1}) / (n/2-1)] - f_{c0,n/2}\}$ (na qual $f_{c0,1} \leq f_{c0,2} \leq \dots \leq f_{c0,n}$), exceto por uma questão de escala, tem o mesmo comportamento da distribuição por amostragem do estimador adotado pela NBR 7190, da ABNT (1997). Assim, inicialmente estudou-se esta distribuição. Para isto foram retiradas, dos dados da Tabela 1, 100 amostras aleatórias de 12 corpos-de-prova e obtidos, para cada uma destas amostras, o valor daquele estimador ($f_{c0,k}$), apresentados na Tabela 4.

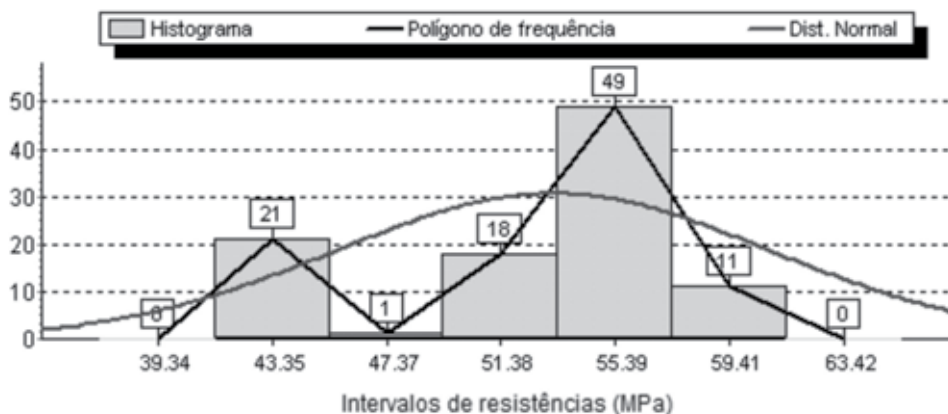


Figura 3. Histograma e polígono de freqüência das resistências características à compressão paralela às fibras, de amostras com 12 corpos-de-prova, estimadas por $f_{c0,k} = f_{c0,min}$.

Figure 3. Histogram and polygon of frequency of the characteristic strength to compression parallel to the grain, of samples with 12 specimens, estimated by $f_{c0,k} = f_{c0,min}$.

Tabela 4. Resistências características à compressão paralela às fibras, estimadas por $f_{c0,k} = \{2 \cdot [(f_{c0,1} + f_{c0,2} + \dots + f_{c0,n/2-1}) / (n/2-1)] - f_{c0,n/2}\}$ (MPa), de amostras com 12 corpos-de-prova.

Table 4. Characteristic strengths to compression parallel to the grain, estimated by $f_{c0,k} = \{2 \cdot [(f_{c0,1} + f_{c0,2} + \dots + f_{c0,n/2-1}) / (n/2-1)] - f_{c0,n/2}\}$ (MPa), of samples with 12 specimens.

Am*	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-----	50,96	52,77	57,15	54,48	54,13	56,64	59,48	53,23	49,66
10	50,87	55,53	54,94	54,27	55,39	53,20	56,79	54,29	55,00	53,83
20	56,63	53,61	52,26	54,69	49,14	49,76	53,40	53,70	53,96	54,84
30	51,38	54,23	53,15	55,38	49,13	52,97	45,29	54,14	54,17	55,96
40	50,67	55,30	56,24	48,27	55,61	49,54	49,39	54,19	48,74	54,02
50	55,57	55,27	49,71	54,97	47,76	54,06	54,27	55,38	55,11	53,60
60	55,50	53,72	51,12	51,37	52,01	56,99	54,52	57,29	48,65	56,74
70	50,30	57,22	53,58	46,33	52,19	52,53	51,13	49,09	48,69	54,56
80	55,92	53,76	56,61	50,26	54,05	56,59	54,73	53,49	58,53	54,96
90	56,36	54,39	48,09	56,02	53,86	46,41	55,45	54,73	55,98	54,86
100	56,11									

* A soma dos valores da primeira linha e da primeira coluna indicam a amostra (Am).

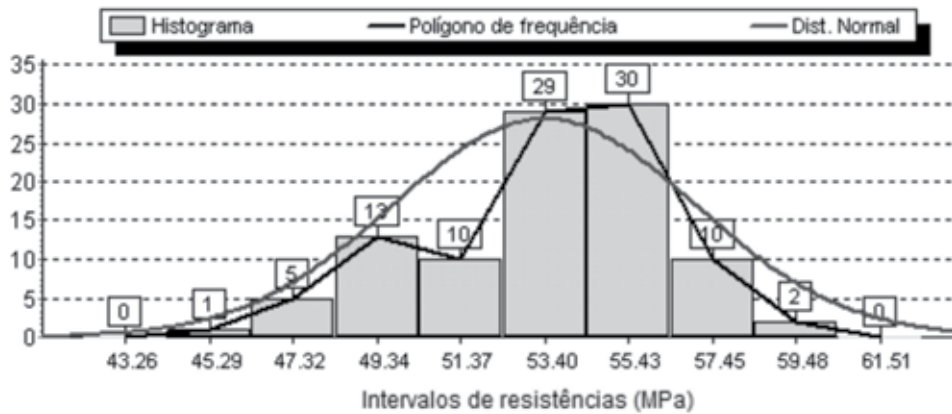


Figura 4. Histograma e polígono de frequência das resistências características à compressão paralela às fibras, de amostras com 12 corpos-de-prova, estimadas por $f_{c0,k} = \{2 \cdot [(f_{c0,1} + f_{c0,2} + \dots + f_{c0,n/2-1}) / (n/2-1)] - f_{c0,n/2}\}$, na qual $f_{c0,1} \leq f_{c0,2} \leq \dots \leq f_{c0,n}$.

Figure 4. Histogram and polygon of the frequency of the characteristic strengths to compression parallel to the grain, of samples with 12 specimens, estimated by $f_{c0,k} = \{2 \cdot [(f_{c0,1} + f_{c0,2} + \dots + f_{c0,n/2-1}) / (n/2-1)] - f_{c0,n/2}\}$, in which $f_{c0,1} \leq f_{c0,2} \leq \dots \leq f_{c0,n}$.

A análise estatística dos resultados apresentados na Tabela 4, utilizando o Programa “Sisvar”, permite obter para a distribuição por amostragem das resistências características à compressão paralela às fibras, utilizando este estimador, o seguinte: média aritmética amostral, $f_{c0,k} = 53,43 \text{ MPa}$; coeficiente de variação, $\delta = 5,38\%$; teste de normalidade de Shapiro-Wilk, $W = 0,9438$ e $pr < W = 0,0003$; teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, $D = 0,1511$ e $pr < D = 0,0184$; o histograma e o polígono de frequências da Figura 4.

Os dois testes de normalidade sugerem decidir pela não normalidade dos dados ($W \neq 1$, $pr < W < 5\%$ e $D \neq 0$, $pr < D < 5\%$).

Por definição o valor médio da distribuição por amostragem das resistências características à compressão paralela às fibras é a resistência característica à compressão paralela às fibras da “população”. No caso do estimador baseado no estimador z_b , sob a forma $f_{c0,k} = \{2 \cdot [(f_{c0,1} + f_{c0,2} + \dots + f_{c0,n/2-1}) / (n/2-1)] - f_{c0,n/2}\}$ (na qual $f_{c0,1} \leq f_{c0,2} \leq \dots \leq f_{c0,n}$), obteve-se um valor ligeiramente subestimado ($f_{c0,k} = 53,43 \text{ MPa}$) da resistência característica à compressão paralela às fibras da “população” ($f_{c0,k} = 53,93 \text{ MPa}$), o que sugere a utilização de um coeficiente (k_b) ligeiramente superior à unidade. No caso, o valor apresentado na Equação 9.

$$k_b = \frac{f_{vk, \text{população}}}{f_{vk, \text{estimado}}} = \frac{53,90}{53,43} \cong 1,0088 \cong 1 \quad (9)$$

CONCLUSÕES

Após analisar estatisticamente os resultados obtidos da população e dos estimadores para obtenção da resistência característica à compressão paralela às fibras, conclui-se que:

- A distribuição de resistências à compressão paralela às fibras não é uma distribuição normal, porém se aproxima muito dela;
- Admitir distribuição normal de resistências à compressão paralela às fibras é trabalhar a favor da segurança, pois o valor característico (quantil de 5%) da distribuição real é ligeiramente superior ao obtido considerando-se distribuição normal;
- É seguro manter o estimador $f_{c0,k} = 0,70 \cdot f_{c0,m}$ (oriundo da distribuição normal), pois mesmo para ensaios realizados sob a égide da NBR 7190, da ABNT (1997), o limite superior para o coeficiente de variação da distribuição de resistências à compressão paralela às fibras é muito próximo de 18%;
- Estimar a resistência característica, à compressão paralela às fibras, pela menor resistência obtida entre os corpos-de-prova da amostra $f_{c0,k} = f_{c0,\text{mín}}$ (oriundo do estimador $z_a = k_a \cdot x_{i,\text{mín}}$) subestima ligeiramente este valor, portanto, de utilização a favor da segurança. Por outro lado, o coeficiente de majoração obtido é tão próximo da unidade ($k_a = 1,0210 \cong 1$), que não justifica a alteração no estimador;
- Estimar a resistência característica, à compressão paralela às fibras, pelo estimador $f_{c0,k} = \{2 \cdot [(f_{c0,1} + f_{c0,2} + \dots + f_{c0,n/2-1}) / (n/2-1)] - f_{c0,n/2}\} \cdot 1,1$, no qual $f_{c0,1} \leq f_{c0,2} \leq \dots \leq f_{c0,n}$ (oriundo do estimador $z_b = \{2 \cdot [(x_1 + x_2 + \dots + x_{m-1}) / (m-1)] - x_m\}$, multiplicado por um coeficiente a fim de corrigir possível excentricidade da amostra), superestima consideravelmente este valor. A excentricidade observada foi muito menor que a considerada pela NBR 7190, da ABNT (1997). O coeficiente de majoração obtido é tão próximo da unidade ($k_b = 1,0088 \cong 1$), que, na prática, pode-se utilizar o estimador $f_{c0,k} = \{2 \cdot [(f_{c0,1} + f_{c0,2} + \dots + f_{c0,n/2-1}) / (n/2-1)] - f_{c0,n/2}\}$, sem qualquer coeficiente de correção.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem: a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT), pelo financiamento; e ao Sr. Artemio Richter, proprietário da Madeireira Richter Ltda., pelo fornecimento da madeira e apoio na fase de coleta de material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 107p.

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. *Anais...* São Carlos: UFSCar, 2000. p.255-258.

FREITAS, A.R. **Probabilistic approach in the design of wood structures in Brazil based on the variability of 23 species**. São Paulo: IPT, 1978. Publicação No 1198.

FUSCO, P.B. **Fundamentos estatísticos da segurança das estruturas**. São Paulo: EDUSP/McGraw-Hill, 1977. 231p.

FUSCO, P.B. **Fundamentos do projeto estrutural**. São Paulo: EDUSP/McGraw-Hill, 1976. 298p.

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

Recebido em 26/10/2009

Aceito para publicação em 06/08/2010

