

RESUMO

Tomando-se amostras de 7 espécies de madeiras da Amazônia foram realizados testes para determinar a confiabilidade de três diferentes medidores de umidade do tipo resistivo quando utilizados para medir a umidade destas espécies na faixa de 6 a 30%. O teor de umidade real foi determinado paralelamente pelo método de secagem em estufa. Os resultados foram obtidos através do desenvolvimento de regressões lineares, comparando-se a umidade real com a umidade determinada pelos medidores. O trabalho propõe correções de umidade das 7 espécies tropicais estudadas para cada um dos medidores, além de discutir a confiabilidade destes aparelhos.

INTRODUÇÃO

Na indústria madeireira ou em qualquer situação onde seja exigido o controle de umidade da madeira, a confiabilidade dos instrumentos ou do método utilizado é de suma importância. O teor de umidade afeta a maioria das mais importantes propriedades da madeira, e pode variar consideravelmente dependendo das condições ambientais e das características de cada espécie. No processamento da madeira para fins específicos, como por exemplo, na produção de móveis e artefatos de madeira, na fabricação de instrumentos musicais, na construção civil e no uso da madeira como suprimento energético, é fundamental que se conheça e se possa controlar o teor de umidade para que se obtenha melhores produtos e economia nos processos.

Na secagem da madeira para a produção de móveis, janelas, portas, vigas laminadas e para outras finalidades, o conhecimento do teor de umidade é importante tanto durante o processamento mecânico da madeira quanto para o seu uso final, pois é necessário que esses produtos fiquem em equilíbrio higroscópico com o ambiente no qual eles vão ser utilizados evitando-se que após algum tempo de uso venham a apresentar defeitos (rachaduras, empenamentos, etc) que possam inclusive inutilizá-los.

Quando se utiliza a madeira para fins energéticos, ou mais especificamente, no caso

(*) Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, Manaus - AM.

da queima de lenha para alimentação de caldeiras, secadoras, grupos geradores a vapor, etc., a determinação do teor de umidade tem também um papel fundamental por causa da relação inversamente proporcional existente entre esta propriedade e o poder calorífico da madeira que influi diretamente sobre o poder de combustão da lenha.

Os medidores que utilizam a resistência elétrica ou as propriedades dielétricas da madeira como um meio para estimar seu teor de umidade são amplamente conhecidos e utilizados na indústria e em laboratórios do mundo inteiro, e são considerados mais vantajosos que o método tradicional (secagem em estufa) por realizarem testes rápidos e não destrutivos. Esses aparelhos, no entanto, foram desenvolvidos em países de condições climáticas diferentes das nossas e por conseguinte, calibrados para espécies madeireiras diferentes das espécies tropicais brasileiras. As tabelas de correção das espécies que acompanham os instrumentos referem-se evidentemente àquelas espécies, fazendo-se portanto necessário desenvolver-se curvas de correção para as madeiras tropicais.

Este estudo tem a finalidade de determinar correções de espécies para três medidores do tipo resistivo quando utilizados para medir a umidade de sete espécies madeireiras da Amazônia, procurando verificar também a confiabilidade desses aparelhos, na faixa de 6 a 30% de umidade.

MÉTODOS

O teor de umidade de muitos materiais é expresso em função do seu peso total, porém no caso da indústria, a prática universal é expressar seu conteúdo de umidade como uma percentagem do seu peso seco (com exceção da indústria de celulose, que usa o peso total como base). Existem vários métodos para se determinar o teor de umidade da madeira e dois deles são aqui discutidos e utilizados:

Método dos medidores elétricos

A medição da resistência elétrica de alguns materiais como um meio de se estimar o seu teor de umidade é bastante conhecida e aplicada atualmente. Os medidores de umidade baseados nesta propriedade elétrica são largamente usados em materiais como madeira, fibras, papel e produtos têxteis.

O princípio utilizado neste tipo de medidor é a resistência da madeira à passagem de uma corrente elétrica entre dois pontos ou, em outras palavras, sua condutividade. Observeu-se que a resistividade medida entre um par de eletrodos numa peça de madeira varia significativamente com seu teor de umidade, e a relação existente entre estas propriedades, abaixo do ponto de saturação das fibras (aproximadamente 30%), é expressa pelas seguintes equações (Brown et al., 1952):

$$r = 10^{11,5 - 0,2 M} \text{ ou } M = 57,5 - 5 \log r \quad (i)$$

onde r = resistividade em ohm/cm

e M = teor de umidade da madeira, em percentagem.

Os medidores elétricos de umidade consistem basicamente em um sistema de eletrodos que aplicam uma diferença de potencial entre dois pontos numa peça de madeira fazendo fluir uma corrente entre esses pontos cuja intensidade depende da quantidade de água presente na madeira, ou seja, da umidade da peça. O sinal de corrente é então transferido para um amplificador onde é convertido eletronicamente em uma forma conveniente de medição e daí para um sistema de leitura (geralmente um amperímetro com escala adequadamente calibrada).

Método de secagem em estufa

Este método é tradicional e tem sido usado como padrão para os outros métodos. Consiste em pesar-se uma amostra de madeira numa estufa à $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até esta amostra apresentar peso constante (seco). O teor de umidade da amostra pode então ser calculado, segundo a norma ASTM D-2016, através da seguinte fórmula (ASTM, 1968):

$$\text{Teor de Umidade da Madeira} \quad \% = \left(\frac{\text{Peso Inicial da Amostra}}{\text{Peso Seco da Amostra}} - 1 \right) \times 100 \quad (\text{ii})$$

MATERIAL

Foram preparadas 24 amostras por espécie com dimensões $8 \times 8 \times 2,5$ cm na condição verde (com umidade acima de 50%). Elas foram cortadas da parte central de uma tábua de dimensões $300 \times 40 \times 2,5$ cm. Após numeradas, tiveram suas extremidades vedadas com uma camada de resina fenólica para evitar o desenvolvimento de gradientes de umidade indesejáveis e o surgimento de rachaduras nas extremidades durante o processo de secagem.

As espécies selecionadas foram:

Andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.)

Cedro (*Cedrela odorata* L.)

Cerejeira (*Torresia acreana* Ducke)

Jacareúba (*Calophyllum brasiliense* Camb.)

Louro Inhamuí (*Ocotea cymbarum* H.B.K.)

Macacaúba (*Platymiscium ulei* Harms.)

Hogno (*Swietenia macrophylla* King)

Os medidores utilizados foram:

- Medidor de umidade da madeira DL 822, marca DIGITEL, de fabricação nacional, com eletrodo de 4 agulhas de 1,1 cm de comprimento distribuído nas pontas de um quadrado de $1,5 \times 1,5$ cm.

- Medidor de umidade LGB-MB System Farenkopf, K.P.M. de fabricação alemã, com eletrodo de duas agulhas de 1,6 cm de comprimento a uma distância de 1,2 cm um do outro.

- Medidor de umidade DC-10 da Moisture Register Co., de fabricação norte-americana, com eletrodo de duas agulhas de 1 cm de comprimento, afastados 2,3 cm um do outro.

Os três medidores estão ilustrados na Figura 1.

Medição

Após terem sido preparadas, as amostras foram devidamente pesadas numa balança de precisão e subseqüentemente mediu-se o teor de umidade de cada uma delas utilizando-se cada um dos três medidores. Em seguida foram colocadas a secar numa estufa a 60^o e a partir daí, em intervalos de aproximadamente 4 horas eram retiradas três amostras de cada espécie para novas pesagens e medições, após terem sido esfriadas num dessecador.

Após serem medidas e pesadas as amostras eram retornadas à estufa. Repetiu-se a operação oito vezes aumentando gradativamente a temperatura da estufa até a temperatura final de 105^oC que foi mantida durante 40 horas até que elas atingissem peso seco.

Foram realizados dois tipos de medições. Uma leitura com os eletrodos dos aparelhos penetrando na madeira de maneira que a corrente fluísse paralela à direção da grã e a outra no sentido perpendicular, com o objetivo de observar se havia diferenças significativas entre os dois procedimentos. De acordo com Stamm (1930) a resistividade elétrica para algumas espécies pode ser duas ou três vezes maior na direção normal às fibras.

A profundidade em que os eletrodos dos medidores são cravados na madeira deve ser observada por causa dos gradientes de umidade que podem aparecer durante a secagem. Os estudos desenvolvidos por Stamm (1930) e Dunlap & Bell (1951) mostram que para madeiras que apresentam gradientes normais deve-se inserir os eletrodos dos medidores de 1/5 a 1/4 da espessura da peça para que se obtenha valores que representam a umidade média da secção transversal da peça. Neste ensaio as agulhas foram sempre cravadas a 1/5 da espessura das amostras.

Todas as medições foram realizadas a 21^oC para que não fosse necessário levar em consideração mais uma variável, uma vez sabido que a resistência elétrica da madeira varia inversamente com a temperatura (James, 1968 e Bramhall & Salomon, 1972).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma visão geral do ensaio está mostrado na Figura 2, que apresenta uma comparação entre os medidores e um medidor ideal. Nota-se que em geral os três medidores subestimam a umidade real da madeira e também apresentam comportamentos bastante diferentes para as mesmas espécies. Estas observações sugerem que provavelmente um ou outro medidor não estava perfeitamente calibrado durante os testes ou que tenha ocorrido um gradiente de umidade indesejável durante a secagem das amostras, talvez devido as suas pequenas dimensões. Isto no entanto, não chega a comprometer as conclusões sobre o ensaio, uma vez que as boas correlações encontradas asseguram, dentro da faixa de 6 a 30% de umidade, correções suficientemente confiáveis para o uso dos aparelhos na prática.

Os gráficos das Figuras 3-5 mostram separadamente as curvas de correção de todas as espécies para cada medidor; a equação para cada uma dessas curvas é da forma $y=a+bx$, determinada através de regressões lineares que correlacionaram as medições feitas com os medidores e os valores obtidos pelo método de pesagem. A Tabela 1 resume os parâmetros

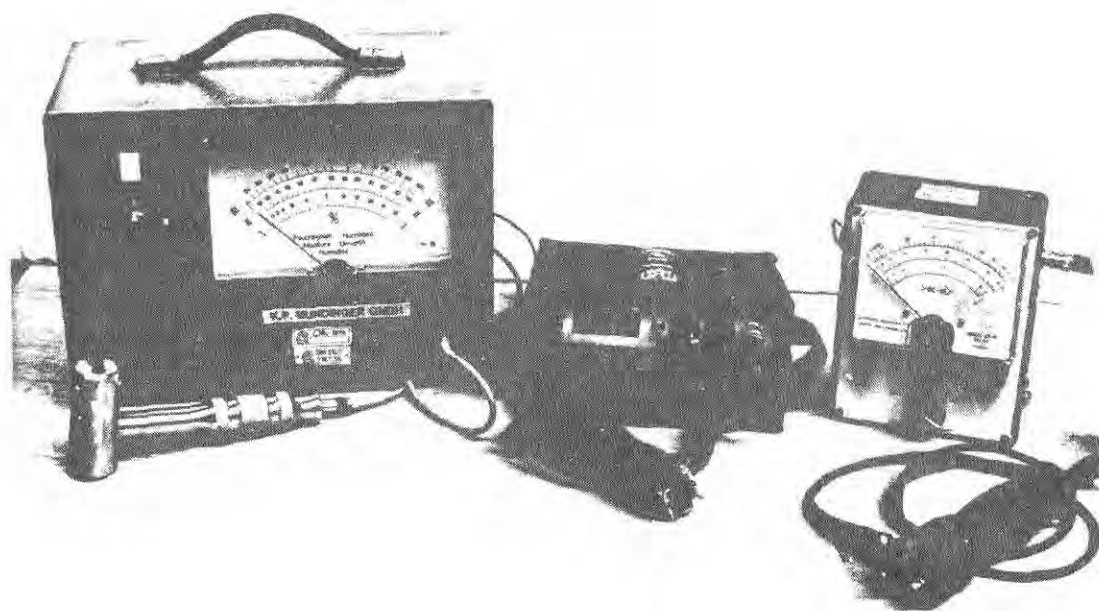


Fig. 1. Medidores de umidade utilizados para determinar os fatores de correção de espécie para sete espécies madeireiras da Amazônia.

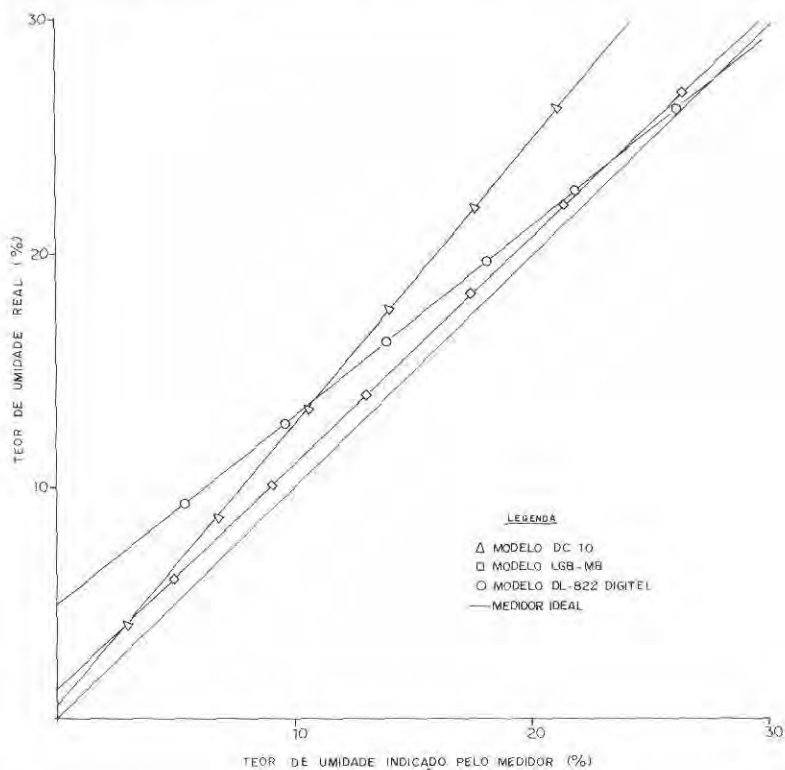


Fig. 2. Comparação entre os medidores utilizados e um medidor ideal para as sete espécies estudadas.

das regressões lineares, os valores de R^2 e a significância estatística da análise realizada. De acordo com esses dados, os resultados obtidos neste ensaio são significantes a nível de 0,1%, na faixa de 6 a 30% de umidade.

Um aspecto interessante que se pode observar nas Figuras 3-5 é o comportamento bastante semelhante das curvas de correção de algumas espécies para cada um dos três medidores. Nota-se que em determinadas faixas de umidade algumas curvas chegam inclusive a se confundirem, sugerindo um possível agrupamento de espécies por medidor, o que em outras palavras significa a possibilidade de se desenvolver correções para grupos de espécies. Esta é uma observação preliminar que necessita ser estudado mais objetivamente, mas que de qualquer forma já oferece uma informação muito valiosa para futuras investigações.

Como era esperado os coeficientes de correlação (R) dos três medidores para cada uma das sete espécies são semelhantes (Tabela 1), indicando que existe uma relação entre as características naturais das espécies e o princípio de medição dos aparelhos. Segundo Lin (1965), medidores resistivos de umidade de madeira provavelmente se baseiam na natureza iônica de substâncias minerais presentes em cada espécie madeireira.

As correções encontradas para as sete espécies estudadas estão apresentadas nas Tabelas 2-4 e foram determinadas através das equações das curvas das Figuras 3-5. Observando-se estas Tabelas pode-se ver que para a maioria das espécies as correções são de ± 3 a 9%, com exceção do louro e do cedro para os medidores DC-10 e DIGITEL onde as correções vão até 15%. À princípio, pode-se afirmar que essas variações são aceitáveis, pois se situam dentro de uma faixa comparável a de resultados obtidos anteriormente com espécies de clima temperado (James, 1961; Bramhall & Salamon, 1972).

Como os medidores apresentaram comportamento diferentes será interessante comentá-los separadamente para destacar alguns aspectos:

LGB-MB

A Figura 2 mostra que de modo geral o LGB-MB foi o medidor que forneceu leituras mais próximas da umidade real da madeira. Para algumas espécies como o mogno e a jacareúba, ele inclusive não precisa de correção como pode ser visto na Tabela 3. Por outro lado, ele também apresentou uma grande variabilidade nas leituras (subestimou a umidade real para algumas espécies e superestimou para outras).

DC-10

Apesar de apresentar um comportamento constante (sempre subestimando a umidade real da madeira), o medidor DC-10 num cômputo geral demonstrou ser menos preciso do que os outros dois analisados neste estudo, como pode ser observado através de uma comparação entre as Tabelas 2-4.

DL-822

A Figura 2 e a Tabela 4 mostram que o medidor DL-822 teve um comportamento intermediário entre os três aqui analisados. Ele subestimou a umidade real da madeira para a maioria das espécies como o DC-10, mas necessita de correções bem menores do que este e em alguns casos até menores do que o LGB-MB.

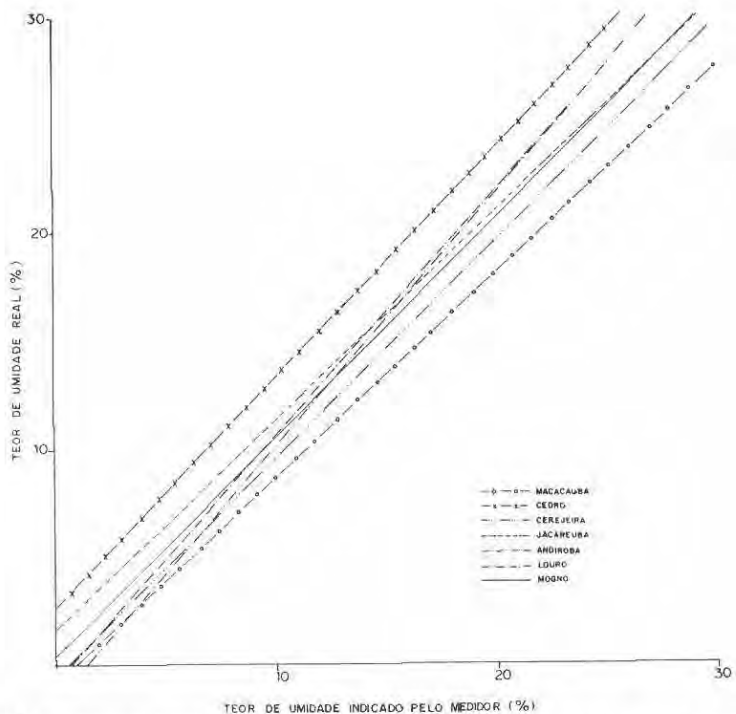


Fig. 3. Correlação entre teor de umidade indicado pelo medidor LGB-MB e teor de umidade determinado pelo método de secagem em estufa para as sete espécies estudadas.

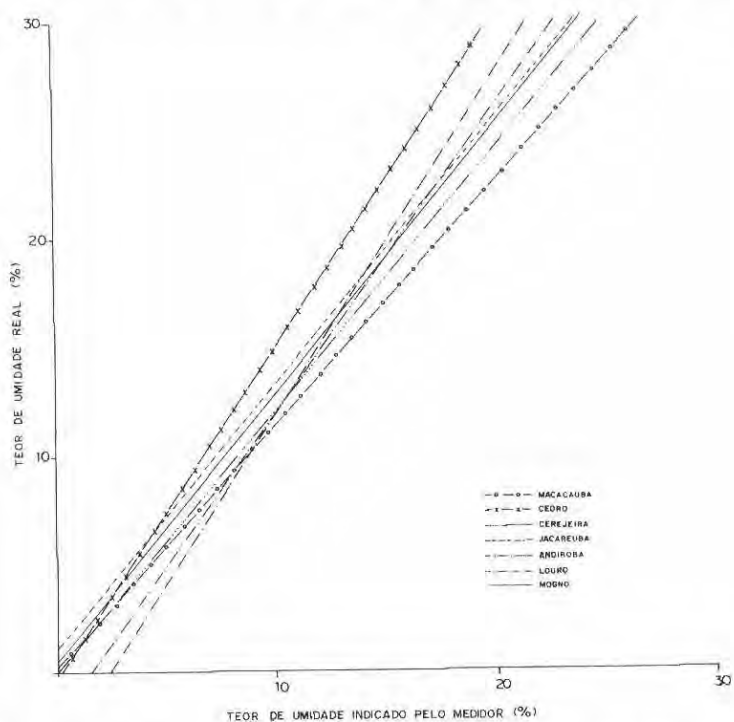


Fig. 4. Correlação entre teor de umidade indicado pelo medidor DC-10 e teor de umidade determinado pelo método de secagem em estufa para as sete espécies estudadas.

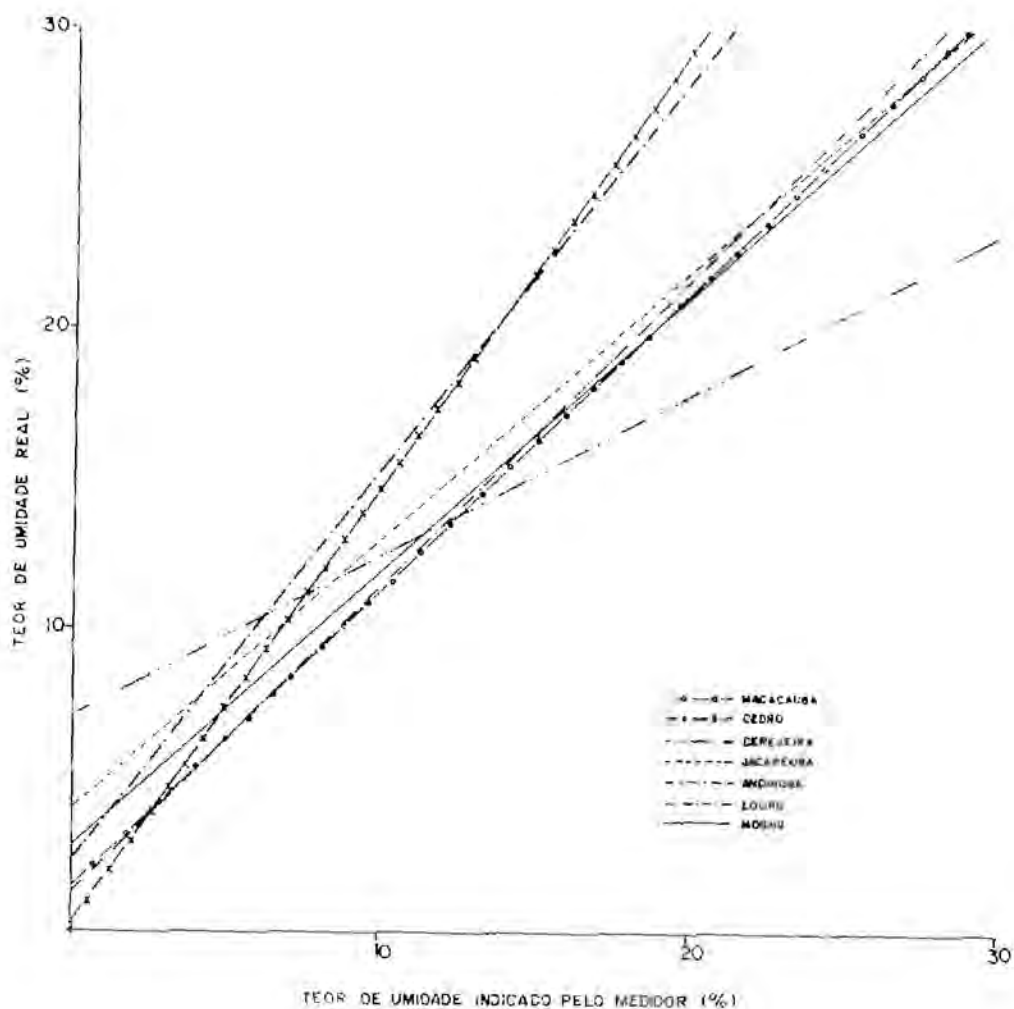


Fig. 5. Correlação entre teor de umidade indicado pelo medidor DL-822 e teor de umidade determinado pelo método de secagem em estufa para as sete espécies estudadas.

Observou-se que as medições feitas com os eletrodos penetrando no sentido paralelo à grã da madeira indicaram valores de umidade geralmente superiores àqueles encontrados com a corrente fluindo perpendicularmente à grã. Este resultado era previsto, pelo fato da madeira apresentar menor resistência elétrica à corrente ao longo das fibras do que em outras direções. No entanto, analisando-se os dados resultantes dos dois procedimentos concluiu-se que as diferenças não são significativas para o uso dos aparelhos na prática, por isso, decidiu-se não apresentar as curvas de correção referentes às medições perpendiculares como resultados visto que elas apenas serviriam para confirmar as normas Bramhall & Salamon (1972) e estudos anteriores sobre o assunto (Skaar, 1972; Panshin & Zeeuw, 1964; Stamm (1960).

Para o objetivo deste estudo, selecionou-se apenas sete espécies madeireiras mais tradicionais no mercado, de modo que as curvas e tabelas de correção resultantes pudessem oferecer de imediato aos usuários dos medidores leituras mais precisas da umidade dessas espécies. Seria necessário, e é objetivo de uma segunda fase deste estudo, ampliar e diversificar consideravelmente o número de espécies a serem analisadas, além de realizar testes mais específicos a fim de que se possa investigar apropriadamente a provável influência de outras propriedades da madeira, além da direção da grã, da temperatura e da própria umidade na determinação do teor de umidade através do princípio da condutividade elétrica. De qualquer modo, já se pode adiantar, com base nos estudos de Stamm (1930) e James (1975) com madeiras de clima temperado que variáveis como densidade, estrutura anatômica e quantidade de extrativos têm pouca influência na determinação da umidade da madeira com a utilização de aparelhos resistivos.

CONCLUSÕES

De modo geral os medidores analisados neste estudo são confiáveis para uso prático, na faixa de 6 a 30% de umidade.

Para obter-se maior precisão será necessário utilizar as Tabelas de correção, que para algumas espécies são fundamentais, principalmente a teores de umidade mais altos.

Para uso industrial as leituras feitas em paralelo ou perpendicular à grã da madeira alteram pouco o resultado.

As semelhanças entre as correções obtidas para algumas das madeiras estudadas, sugerem que é possível desenvolver correções por grupo de espécies para as madeiras Amazônicas.

AGRADECIMENTOS

A autora agradece ao pesquisador ROLAND E. VETTER pela ajuda nas análises estatísticas.

SUMMARY

With wood from 7 indigenous Amazon wood species tests were conducted to determine the accuracy of three different resistance type moisture meter in measuring M.C. within the range of 6 to 30%. Actual wood moisture content was measured using oven-dry method. Results were obtained through the development of linear regressions comparing actual wood moisture content with moisture meters reading. The research results allow for M.C. Corrections for each of the three meters and each of the tropical species under investigation and also show the reliability of each of the moisture content meters used.

Tabela 1. Parâmetros da análise de regressão.

Espécie	Medidor	Parâmetros da Regressão Linear		R ²	F	Significância
		a	b			
Macacaúba	LGB-MB	-1,00	0,93	0,92	258,16	***
	DC-10	-0,01	1,10	0,93	300,43	***
	DL-822	1,37	0,96	0,88	150,46	***
Cedro	LGB-MB	2,44	1,05	0,88	114,17	***
	DC-10	-0,40	1,50	0,86	97,54	***
	DL-822	0,10	1,43	0,85	86,11	***
Cerejeira	LGB-MB	-0,66	0,99	0,93	105,76	***
	DC-10	-0,17	1,18	0,95	146,21	***
	DL-822	6,64	0,52	0,92	83,67	***
Jacareúba	LGB-MB	1,40	0,96	0,78	49,67	***
	DC-10	0,89	1,20	0,77	46,75	***
	DL-822	3,88	0,87	0,74	39,89	***
Andiroba	LGB-MB	-1,75	1,15	0,88	143,12	***
	DC-10	-2,13	1,38	0,94	334,93	***
	DL-822	1,13	0,99	0,93	266,11	***
Louro	LGB-MB	-0,83	1,11	0,77	51,76	***
	DC-10	-3,73	1,53	0,83	73,19	***
	DL-822	2,18	1,27	0,91	160,09	***
Mogno	LGB-MB	0,21	1,00	0,94	317,85	***
	DC-10	0,29	1,22	0,92	211,39	***
	DL-822	2,58	0,90	0,96	417,46	***

*** Significante a nível de 0,1% aplicando-se o teste F.

Tabela 2. Correções de espécies para medidor de umidade modelo DC-10 - MOISTURE REG. CO. (*)

Teor de umidade Indicado no medidor %	Macacaúba %	Cerejeira %	Jacareúba %	Andiroba %	Mogno %	Cedro %	Louro %
6	7	7	8	6	8	9	5
7	8	8	9	8	9	10	7
8	9	9	10	9	11	12	9
9	10	11	11	10	12	13	10
10	11	12	12	12	13	15	12
11	12	13	14	13	14	16	13
12	13	14	15	16	15	18	15
13	14	15	16	17	17	19	16
14	15	16	17	19	18	21	18
15	17	18	19	20	19	22	19
16	18	19	20	21	20	24	21
17	19	20	21	22	21	25	22
18	20	21	22	23	23	27	24
19	21	22	23	24	24	28	25
20	22	24	25	26	25	30	27
21	23	25	26	27	26	31	29
22	24	26	27	28	27	33	30
23	25	27	28	30	29	34	32
24	27	28	29	31	30	36	33
25	28	30	31	32	31	37	35
26	29	31	32	34	32	39	36
27	30	32	33	35	33	40	38
28	31	33	34	37	35	42	39
29	32	34	36	38	36	43	41
30	33	35	37	39	37	45	42

* Valores obtidos através da equação $Y=a+bx$ determinada para cada espécie.

Tabela 3. Correções de espécies para medidor de umidade modelo LGB-MB, K.P.M. (*)

Teor de umidade Indicado no medidor	Macacaúba	Cerejeira	Jacareúba	Mogno	Louro-Inha muí	Andiroba	Cedro
%	%	%	%	%	%	%	%
6	5	5	7	6	6	5	9
7	6	6	8	7	7	6	10
8	6	7	9	8	8	7	11
9	7	8	10	9	9	9	12
10	8	9	11	10	10	10	13
11	9	10	12	11	11	11	14
12	10	11	13	12	13	12	15
13	11	12	14	13	14	13	16
14	12	13	15	14	15	14	17
15	13	14	16	15	16	15	18
16	14	15	17	16	17	17	19
17	15	16	18	17	18	18	20
18	16	17	19	18	19	19	21
19	17	18	20	19	20	20	22
20	18	19	21	20	21	21	23
21	19	20	22	21	23	22	25
22	19	21	23	22	24	24	26
23	20	22	23	23	25	25	27
24	21	23	24	24	26	26	28
25	22	24	25	25	27	27	29
26	23	25	26	26	28	28	30
27	24	26	27	27	29	29	31
28	25	27	28	28	30	30	32
29	26	28	29	29	32	32	33
30	27	29	30	30	33	33	34

* Valores obtidos através da equação $Y = a + bx$ determinada para cada espécie.

Tabela 4. Correções de espécies para medidor de umidade modelo DL-822 - DIGITEL. (*)

Teor de umidade Indicado no medidor %	Cedro %	Louro-Inha- muí %	Macacaúba %	Jacareúba %	Mogno %	Andiroba %	Cerejeira %
6	9	10	7	9	8	7	10
7	10	11	8	10	9	8	11
8	12	12	9	11	10	9	11
9	13	14	10	12	11	10	12
10	14	15	11	13	12	11	12
11	16	16	12	14	13	12	13
12	7	18	13	14	13	13	13
13	19	19	14	15	14	14	14
14	20	20	15	16	15	15	14
15	22	21	16	17	16	16	15
16	23	23	17	18	17	17	15
17	24	24	18	19	18	18	16
18	26	25	19	20	19	19	16
19	27	26	20	21	20	20	17
20	29	28	21	21	21	21	17
21	30	29	22	22	22	22	18
22	32	30	23	23	22	23	18
23	33	32	24	24	23	24	19
24	34	33	25	25	24	25	20
25	36	34	26	26	25	26	20
26	37	35	27	27	26	27	21
27	39	37	28	28	27	28	21
28	40	38	29	28	28	29	22
29	42	39	29	29	29	30	22
30	43	40	30	30	30	31	23

* Valores obtidos através da equação $Y=a+bx$ determinada para cada espécie.

Referências bibliográficas

- American Society for Testing and Material - 1968. **Methods of Measuring Moisture Content of Wood. ASTM Standard D-2016.** Philadelphia, Pa.
- Bramhall, G. & Salamon, M. - 1972. **Combined species-temperature Correction Tables for Moisture Meters. Western Forest Products Laboratory Rep. VP-X.103,** Vancouver, B.C.
- Brown, H. P.; Panshin, A. J.; Forsaith, C. C. - 1932. **Textbook of wood Technology.** MacGraw-Hill Book Company, v. 2. 761 p.
- Dunlap, M. E. & Bell, E. R. - 1951. **Electrical Moisture Meters for wood.** Madison; Forest Products Laboratory. 17 p.
- James, W. L. - 1961. **Calibration of Electric Moisture Meters for Jack and Red Pine, Black Spruce, Paper Birch, Black Ash, Eastern Hemlock and Bigtooth Aspen.** Madison, Wis., **V.S. Forest Products Laboratory,** rpt. n° 2208, 7p. ILLUS.
- - 1968. **Effect of Temperature on Readings of Electric Moisture Meters.** **Forest Products Journal,** 18(10):1-23.
- - 1975. **Electric Moisture Meters for Wood.** Madison, Wis., USDA Forest Service. **General Technical Report FPL,** 6:1-27.
- - 1981. **Influence of Electrode Design on Measurements of dielectric Properties of Wood.** **Wood Science,** 3(4):
- Lin, R. T. - 1965. **A Study of Electrical Conduction in Wood.** **Forest Products Journal,** Madison, 15(11):506-514.
- Panshin, A. J. & de Zeeuw, C. - 1964. **Textbook of Wood Technology.** New York, McGraw-Hill, 2. ed., v. 1. 705 p.
- Skaar, C. - 1972. **Water in Wood.** New York, Syracuse Univ. Press. 218 p.
- Stamm, A. J. - 1930. **An Electrical Conductivity Method for Determining the Moisture Content of Wood.** **Ind. Eng. Chem. Anal.** (2):240-244.
- - 1960. **Bound Water Diffusion into Wood in Across the Fiber Directions.** **Forest Products Journal,** Madison, 10(10):524-528.

(Aceito para publicação em 22.08.1988)