"DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE EM MADEIRAS POR MEIO DE MEDIDORES ELÉTRICOS"

WALDEMIR RODRIGUES

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais.

ORIENTADOR: Prof. Dr Almir Sales

São Carlos

1999

Class.	4936
0262	99

S/S 1045 825

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

R696d Rodrigues, Waldemir
 Determinação do teor de umidade em madeiras por meio
 de medidores elétricos / Waldemir Rodrigues. -- São
 Carlos, 1999.

 Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São
 Carlos/Instituto de Física de São Carlos/Instituto de
 Química de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.
 Área Interunidades: Ciência e Engenharia de Materiais.
 Orientador: Prof. Dr. Almir Sales.

1. Umidade. 2. Medidas elétricas. I. Título.

Ciência e Engenharia de Materiais

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Carlos

Instituto de Física de São Carlos

Instituto de Química de São Carlos

CAIXA POSTAL - 369

CEP 13560-970 - São Carlos/SP - Brasil

Tel/Fax: (016) 273-9777

E-mail: erica@if.sc.usp.br

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **WALDEMIR RODRIGUES**, APRESENTADA A ÁREA INTERUNIDADES EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, DA EESC-IFSC-IQSC, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 02/7/1999.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. *Almir Sales* (Orientador) (UFSCar)

Prof. Dr. *Mauro Augusto Demarzo* (UNICAMP)

Prof. Dr. *Milton Ferreira de Souza* (IFSC-USP)

AGRADECIMENTO

Ao Professor Almir Sales por sua dedicação, atenção, pela sua amizade e pela maneira com que orientou este trabalho, tornando-o bastante proveitoso.

Ao Professor Carlito Calil Junior pela sua atenção, e ajuda no desenvolvimento deste trabalho e pela amizade.

À minha mãe e meus irmãos pelo incentivo e ajuda decisiva no momento mais importante de minha vida.

Aos meus filhos a quem privei do meu convívio durante todo esse tempo e a quem dedico este trabalho.

À Vera pelo carinho, amor, dedicação, pelo apoio, incentivo e ajuda que me deu nos momentos difíceis pelos quais eu passei.

Aos Professores, colegas e funcionários do LaMEM pela convivência, em especial aos que contribuíram diretamente para a elaboração deste trabalho.

Aos amigos de Cuiabá especialmente ao Laerte, Romildo e Henriques pela ajuda e pelas amizades.

Ao Laerte amigo e companheiro de todas as horas meus sinceros agradecimentos pela ajuda e incentivo, durante todo tempo.

Aos Professores Roberto Farias e José Alberto Giacometti pela amizade e pela atenção dada, durante o início deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	v
RESUMO.....	vii
ABSTRAT.....	viii
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - OBJETIVOS.....	5
3 - REVISÃO DA LITERATURA.....	6
3.1 Movimento de Água na Madeira.....	12
3.2 Métodos de determinação do teor de umidade da madeira.....	14
3.3 Medidores de teor de umidade do tipo resistência.....	15
3.4 Características principais da propriedade dielétrica da madeira.....	16
3.5 Polarização da Madeira.....	20
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4.1 Espécies utilizadas na pesquisa.....	32
4.2 Preparação dos corpos de provas.....	32
4.3. Determinação da umidade inicial.....	34
4.4 Medidor elétrico do tipo resistência.....	35
4.5. Determinação do teor de umidade por meio de medidores elétricos de resistência.....	36
4.6 Tipos de eletrodos utilizados em medidores elétricos de resistência.....	37

4.7 Determinação dos teores de umidade durante o processo de secagem.....	38
4.8 Espécies utilizadas para a determinação da constante dielétrica.....	39
4.9 Equipamento utilizado para medida de constante dielétrica.....	40
5.RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
5.1 Determinação do teor de umidade da madeira por meio de equipamento do tipo capacitância.....	42
5.2 Valor da massa específicas para as espécies em estudo.....	43
5.3 Valores dos teores de umidade obtidos para as espécies em estudo.....	45
5.4 Análise descritiva e gráfica.....	46
5.4.1 Análise dos resultados obtidos para a espécie <i>Goupia glabra</i> (dicotiledônea C30).....	46
5.4.1.2 Análise de regressão linear da escala "L ₁ " para a espécie <i>Goupia glabra</i> (dicotiledônea C30).....	48
5.4.2 Análise dos resultados obtidos para a espécie <i>Pouteria pachycarpa</i> (dicotiledônea C30).....	51
5.4.2.1 Análise de regressão linear da escala "L ₃ " para espécie <i>Pouteria</i> <i>pachycarpa</i> ..(dicotiledônea C30).....	52
5.4.3 Análise dos resultados obtidos para a espécie <i>Eucalyptus citriodora</i> (dicotiledônea C40).....	55
5.4.3.1 Análise de regressão linear da escala "L ₁ " para a espécie <i>Eucalyptus</i> <i>citriodora</i> (dicotiledônea C40).....	56
5.4.4 Análise dos resultados obtidos para a espécie <i>Hymenea ssp</i> (dicotiledônea C60).....	60

5.4.4.1	Análise de regressão linear da escala "L ₃ " para a espécie <i>Hymenea</i> ssp(dicotiledônea C60).....	61
5.4.5	Análise dos resultados obtidos para a espécie <i>Pinus elliotti</i> . var. <i>elliotti</i> (conífera C25).....	63
5.4.5.1	Análise de regressão linear da escala "L ₁ " para a espécie <i>Pinus elliotti</i> var. <i>elliotti</i> (conífera C25).....	65
6.	CONCLUSÕES.....	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - Relação entre resistência elétrica e teor de umidade.....	6
FIGURA 02 - Logaritmo da resistividade versus valor recíproco da temperatura absoluta para vários teores de umidade.....	8
FIGURA 03 - Efeito do teor de umidade da madeira sobre a constante dielétrica em alta frequência.....	16
FIGURA 04 - Variação da constante dielétrica com o teor de umidade em diferentes frequências.....	17
FIGURA 05 - Representação esquemática de um capacitor.....	18
FIGURA 06 - Representação de um diagrama da seção transversal das células das paredes da madeira.....	27
FIGURAS 07 -Representação esquemática do aumento instantâneo da polarização após um incremento no campo elétrico.....	29
FIGURA 08 - Circuito equivalente da madeira como dielétrico.....	29
FIGURA 09 - Esquema de retirada das amostras para medidas do teor de umidade e da densidade básica.....	33
FIGURA 10 - Tipologia das amostras utilizadas para a determinação do teor de umidade.....	34
FIGURA 11 - Medidor elétrico do tipo resistência.....	36
FIGURA 12 - Colocação dos eletrodos paralelos às fibras.....	37
FIGURA 13 - Relação entre leitura de medidores com 2 e 4 pinos.....	37
FIGURA 14 - Esquema da amostra utilizadas para medidas com eletrodo de contato de superfície para constante dielétrica.....	39
FIGURA 15 - Equipamento utilizado para medida de constante dielétrica.....	40
FIGURA 16 - Relação entre constante dielétrica e logaritmo da frequência.....	43
FIGURA 17 - Relação entre teor de umidade medidas em estufa e as leituras dos teores de umidade medidos pelo equipamento para Goupia glabra.....	46
FIGURA 18 - Relação entre a leitura do medidor na escala L_i e o teor de umidade medido pela estufa para Goupia glabra.....	48

FIGURA 19 - Gráfico dos resíduos contra os valores de U_{real} para <i>Goupia glabra</i>	50
FIGURA 20 - Relação entre teor de umidade medida em estufa e as leituras dos teores de umidade medidos pelo equipamento para <i>Pouteria pachycarpa</i>	51
FIGURA 21 - relação entre a leitura do teor de umidade na escala I_3 e o teor de umidade medido pela estufa para <i>Pouteria pachycarpa</i>	53
FIGURA 22 - Gráfico dos resíduos contra os valores de U_{real} para <i>Pouteria pachycarpa</i>	54
FIGURA 23 - Relação entre teor de umidade medido em estufa e as leituras dos teores de umidade medidos pelo equipamento para <i>Eucalyptus citriodora</i>	55
FIGURA 24 - Relação entre a leitura do teor de umidade na escala L_1 e o teor de umidade medido pela estufa para <i>Eucalyptus citriodora</i>	57
FIGURA 25 - gráfico dos resíduos contra os valores de U_{real} para <i>Eucalyptus citriodora</i>	59
FIGURA 26 - Relação entre o teor de umidade medido em estufa e as leituras dos teores de umidade medidos pelo equipamento para <i>Hymenea ssp</i>	60
FIGURA 27 - Relação entre a leitura do teor de umidade na escala L_1 e o teor de umidade medido pela estufa para <i>Hymenea ssp</i>	61
FIGURA 28 - Gráfico dos resíduos contra os valores de U_{real} para <i>Hymenea ssp</i>	63
FIGURA 29 - Relação entre teor de umidade medido em estufa e as leituras dos teores de umidade medidos pelo equipamento para <i>pinus elliotti</i> var. <i>elliotti</i>	64
FIGURA 30 - Relação entre a leitura do teor de umidade medido na escala L_2 e o teor de umidade medido pela estufa para <i>Pinus elliotti</i> var. <i>elliotti</i>	65
FIGURA 31 - Gráfico dos resíduos contra valores de U_{real} para <i>Pinus elliotti</i> var. <i>elliotti</i>	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Massa específica para as espécies em estudo.....	44
TABELA 2 - Valores médios dos teores de umidade obtidos por meio do método da estufa e pelo método do medidor elétrico do tipo resistência.....	45
TABELA 3 - Variação das leituras das escalas do equipamento em relação aos teores de umidade medidos pelo método de estufa para <i>Goupia glabra</i>	47
TABELA 4 - Análise de variância para a espécie <i>Goupia glabra</i>	49
TABELA 5 - Coeficiente de regressão para a relação entre U_{real} e U_{L1} para a espécie <i>Goupia glabra</i>	49
TABELA 6 - Variação das leituras das escalas do equipamento em relação aos teores de umidade medidos pelo método de estufa para <i>Pouteria pachycarpa</i>	52
TABELA 7 - Análise de variância para a espécie <i>Pouteria pachycarpa</i>	53
TABELA 8 - Coeficiente de regressão para a relação entre U_{real} e U_{L3} para a espécie <i>Pouteria pachycarpa</i>	54
TABELA 9 - Variação das leituras das escalas do equipamento em relação aos teores de umidade medidos pelo método da estufa para <i>Eucalyptus citriodora</i>	56
TABELA 10 – Análise de variância para a espécie <i>Eucalyptus citriodora</i>	57
TABELA 11 – Coeficientes de regressão para a relação entre U_{real} e U_{L1} para a espécie <i>Eucalyptus citriodora</i>	58

TABELA 12 – Variação das leituras das escalas do equipamento em relação aos teores de umidade medidos pelo método das estufas para <i>Hymenea ssp</i>	61
TABELA 13 – Análise de variância para a espécie <i>Hymenea ssp</i>	62
TABELA 14 – Coeficientes de regressão para a relação entre U_{real} e U_{L3} para a espécie <i>Hymenea ssp</i>	62
TABELA 15 – Variação das leituras das escalas do equipamento em relação aos teores de umidade medidos pelo método da estufa para <i>Pinus elliotti</i>	64
TABELA 16 – Análise de variância para a espécie <i>Pinus elliotti</i> var. <i>elliotti</i>	65
TABELA 17 – Coeficientes de regressão para a relação entre U_{real} e U_{L2} para a espécie <i>Pinus elliotti</i> var. <i>elliotti</i>	66
TABELA 18 - Escalas sugeridas pelo fabricante e escalas que apresentaram menor variabilidade dos valores obtidos com o medidor do tipo resistência em relação ao método da estufa.....	68

LISTAS DE SÍMBOLOS

ϵ_0 - constante dielétrica do ar

ϵ - constante dielétrica absoluta

ϵ' - constante dielétrica relativa

$\vec{P}$ - vetor polarização

$\vec{E}$ - vetor campo elétrico

$\vec{D}$ - vetor deslocamento elétrico

χ - susceptibilidade elétrica

τ_0 - constante de tempo de polarização

τ - tempo em um instante qualquer

N - quantidade de momento dipolar

$P_d(t)$ - nível de polarização em um instante qualquer

$P_d(0)$ - nível de polarização no instante em que o campo elétrico é removido

P_e - polarização eletrônica

P_a - polarização iônica (atômica)

P_d - polarização dipolar (orientacional)

P_v - polarização interfacial (estrutural)

P_z - polarização eletrolítica

T_{ui} - teor de umidade inicial

M_u . massa úmida

M_s - massa seca

T_a - teor de umidade inicial

M_{atual} - massa atual das amostras

$U_{L1,2,3}$ -teores de umidade das amostras lidas pelo do medidor

U_{real} - umidade real da amostra

P_{atual} - massa atual da amostra

$P_{inicial}$ - massa inicial da amostra

U_i - amostra para determinação da umidade inicial

Db - Amostra para se fazer a determinação da densidade básica

RESUMO

A madeira quando seca é um excelente isolante elétrico, porém quando a umidade da madeira aumenta, essa característica diminui fazendo com que esta passe a conduzir a corrente elétrica. A determinação do teor de umidade permite um controle do custo de produção e qualidade da madeira, além de facilitar a utilização de tratamentos preservativos e pintura. O método de determinação do teor de umidade com o uso de estufa é o método mais exato, e por esta razão é utilizado como padrão para calibrar outras técnicas. Por outro lado, a verificação do teor de umidade por meio da estufa é muito demorado e danifica parte do componente a ser analisado. O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para calibrar medidores elétricos de umidade, utilizando espécies de dicotiledôneas nativas e coníferas de florestamento. Na experimentação realizada foi possível constatar que apesar da menor precisão na determinação de teores de umidade, o método que utiliza medidores de umidade do tipo resistência, permite com algumas correções, a obtenção de valores confiáveis para o controle de umidade de peças de madeira serrada. Para isso foram desenvolvidas expressões obtidas por meio de análise de regressão linear que possibilitam fazer as correções necessárias nas leituras realizadas com o medidor elétrico do tipo resistência.

ABSTRACT

Wood when dry is an excellent electric insulating material. However when the moisture content of wood increases, that feature decreases, which makes it conduct electric current. Determining the moisture content allows the control of the production cost and the quality of the timber, and also facilitates the use of preservative treatments and painting. The method for the determination of the moisture content using the kiln is the most exact method, and therefore it is used as standard to calibrate other techniques. On the other hand, the verification of the moisture content by means of the kiln takes too much time and damages part of the component to be analyzed. The aim of this work is to propose a methodology to gauge electric moisture meters using species of tropical and forestation hardwood and softwood. The experiments made it possible to verify that, even having less accuracy in determining the moisture content, the method based on moisture electric meters allows, with some adjustments, a reliable data acquisition for the control of moisture content of sawed lumber. For this matter, equations were developed by means of linear regression analysis allowing the necessary corrections of the readings carried out with the electric measurer of the resistance type.

1 INTRODUÇÃO

As árvores são organismos vivos e a variação de suas estruturas depende do meio ambiente no qual elas crescem. Diferenças entre árvores ou dentro da mesma árvore podem ocorrer na mesma região ou em regiões diferentes. Portanto, existem variações na estrutura anatômica da árvore relacionadas com as propriedades físicas, embora muitas dessas variabilidades dentro de uma espécie ou de espécies diferentes não sejam de fácil identificação, PANSIN & DE ZEEUW (1970).

Como todo ser vivo, a árvore necessita de água para sua sobrevivência, pois é por meio dela que a alimentação, necessária para a sua manutenção, é levada a todas as suas partes. Por isso a umidade em árvores recém derrubadas é muito grande podendo chegar até a valores elevados. Essa variação é bastante influenciada por vários fatores, tais como: espécie, posição da madeira na árvore, meio ambiente, etc, TSOUKAS (1991).

A madeira é um material higroscópico, ou seja, possui a propriedade de atrair ou não umidade da atmosfera circunvizinha e mantê-la na forma de água líquida ou vapor de água dependendo de como se encontra o meio ambiente no qual está inserida, TSOUKAS (1991).

Segundo GALVÃO & JANKOWSKY (1985), existe na madeira dois tipos de água: água livre ou de capilaridade e água de adesão. A água livre está localizada no lúmen das células (vasos, traqueídeos, fibras, etc), sendo que esse tipo de água começa a ser eliminada de forma rápida assim que a árvore é abatida, sem que a madeira venha sofrer deformações significativas.

A água de adesão é a que está contida nas paredes celulares, a qual é ligada às moléculas de celulose, sendo que esse tipo de água é eliminada quando se fornece energia à madeira. A água de adesão é de grande importância quando se faz qualquer tipo de consideração sobre a utilização comercial da madeira, e o teor de umidade correspondente a esse ponto de transição é chamado de ponto de saturação das fibras (PSF). A umidade contida na madeira no ponto de saturação das fibras varia, de espécie para espécie mas é em média de aproximadamente 30%, TSOUMIS (1991).

O controle da umidade da madeira apresenta uma série de vantagens tais como: controle do peso para diminuição dos custos de transporte, controle do encolhimento da madeira para efeito de usinagem, controle da aplicação de verniz e tinta, controle da ação de fungos e da qualidade das juntas de colagem. Além disso propicia melhor impregnação com líquidos preservativos e permite um incremento na resistência mecânica da madeira, GALVÃO & JANKOWSKY (1985).

A determinação da umidade da madeira é uma pré-condição para se utilizar a madeira de maneira racional, uma vez que ela afeta as mais importantes propriedades deste material. Por isso existem vários métodos de se medir a umidade da madeira. O teor

de umidade da madeira é definido como peso de água no seu interior expresso como percentagem do peso seco, onde peso seco é o peso da amostra da madeira submetida à secagem em estufa, à temperatura entre 101⁰C e 105⁰C até que pesagem sucessivas apresentem valores constantes.

De acordo com a AMERICAN STANDARD TESTING MATERIAL ASTM (1992), a avaliação do teor de umidade com base no peso seco é geralmente aceito como método básico para trabalho em laboratório, ou como padrão para calibragem de outros métodos. Existem vários métodos de determinação de teor de umidade da madeira sendo que os mais utilizados são: o método de determinação por meio de estufa e o que utiliza medidores elétricos.

O método de se determinar a umidade por meio da estufa é mais exato, pois as quantidades que definem esse teor são medidas diretamente. Por ser destrutivo, demorado e precisar de equipamento adicional como balança de precisão e, além disso necessitar de no mínimo de 24 a 48 horas para se determinar a umidade, faz com que os métodos que utilizam medidores elétricos sejam utilizados mais freqüentemente. Por outro lado, devido à precisão do método da estufa, este é utilizado para calibrar os medidores elétricos de umidade ASTM (1992).

Entres as vantagens de se usar medidores elétricos de umidade vale destacar: propicia leitura imediata, o instrumento é portátil, efetua medidas não destrutivas, custo de medida é pequeno, e, é de fácil aplicação. Por outro lado, possui as seguintes

desvantagens: precisão relativamente menor do que o do método da estufa, baixa precisão para medidas acima do ponto de saturação das fibras. Além disso, as leituras podem ser afetadas pelos seguintes fatores: espécie da madeira, densidade, temperatura da amostra e condições atmosféricas.

2.OBJETIVOS

Dentro do contexto apresentado, o presente trabalho possui os seguintes objetivos:

- ◆ Propor parâmetros para calibrar medidores de teor de umidade de madeira do tipo elétrico, em relação aos valores determinados por meio de estufa, em peças de madeira serradas;
- ◆ Determinar expressões que permitam minorar a variação da leitura do teor de umidade obtida por meio de medidores elétricos para a madeira serrada das seguintes espécies:
 - ◆ *Goupia glabra*
 - ◆ *Pouteria pachycarpa*
 - ◆ *Eucalyptus citriodora*
 - ◆ *Hymenea ssp*
 - ◆ *Pinus elliottii* var. *elliottii*

3. REVISÃO DA LITERATURA

A medida de resistividade ou de resistência elétrica da madeira tem sido usada industrialmente como uma técnica para se calcular o teor de umidade, SKAAR (1988). A madeira quando seca é um excelente isolante elétrico, sendo que a resistência da madeira à passagem de corrente diminui com o aumento do teor de umidade, como pode ser observado através da Figura 1, KOLLMANN & CÔTÉ (1984).

Figura1- Relação entre resistência elétrica e teor de umidade para Douglas Fir KOLLMANN & CÔTÉ(1984)

VERMAAS apud SKAAR (1988) enumerou diversos fatores que afetam os valores medidos da resistência em corrente contínua (c.c) em madeiras. Os primeiros fatores descritos na pesquisa são: teor e distribuição de umidade, temperatura, orientação das fibras, densidade, componentes químicos, extrativos, teor de cinzas e constituintes principais pertencentes à característica da espécie da madeira.

A segunda categoria de fatores pode ser classificada como externos, entre os quais merecem destaque: tipos de eletrodos e as suas configurações, pressão de contato, forma da amostra e dimensões, efeitos eletrolíticos nos eletrodos e a grandeza e duração da tensão aplicada.

Segundo KOLLMANN & CÔTÉ (1984), a resistência elétrica decresce rapidamente quando o teor de umidade aumenta e o mecanismo de condução elétrica depende da presença de íons na madeira. STAMM (1927) apud SKAAR (1988) foi o primeiro a descrever quantitativamente a diminuição da resistividade elétrica da madeira com o aumento do teor de umidade, e por isso o desenvolvimento inicial dos medidores elétricos foram em grande parte baseados em seus estudos.

CLARK & WILLIAMS citado por KOLLMANN & CÔTÉ (1984) determinaram a resistividade (resistência em ohm x cm) de várias amostras de madeiras secas a 105°C durante várias semanas e, extrapolaram os resultados para a temperatura ambiente obtendo valores entre 3×10^{17} e 3×10^{18} ohm x cm. Resultado semelhante foi obtido por SKAAR (1988), sendo que também foi observado que quando o teor de umidade atingia um valor em torno de 7%, a resistividade diminuía para 10^{11} ohms x

cm, mas decrescia lentamente à medida que se aproximava do ponto de saturação das fibras. É nesse intervalo que o medidor do tipo resistência possui uma maior precisão de leitura.

A temperatura da madeira tem o mesmo efeito em sua resistividade que o aumento do teor de umidade ou seja a resistividade decresce com o aumento da temperatura. O efeito da temperatura, pode ser observado na resistividade da madeira conforme Figura 2, KOLLMANN & CÔTÉ(1984)

Figura 2-Logaritmo da resistividade versus valor recíproco da temperatura absoluta para vários teores de umidade de Engelmann spruce,. KOLLMANN & CÔTÉ(1984)

O fato do efeito da temperatura sobre a resistividade da madeira ser oposto ao que ocorre na resistência elétrica dos metais sugere que o mecanismo de condução

elétrica naquele material pode ser explicado pelo mecanismo de portadores de cargas cujo número e mobilidade aumenta com a atividade térmica, JAMES (1988).

HIRUMA (1915) apud KOLLMANN & CÔTÉ(1984) observou que a orientação estrutural da direção das fibras também afeta a condutividade elétrica longitudinal da madeira. KURODA & TSUTUMI apud SKAAR (1988), observaram que além do teor de umidade da madeira afetar a condutividade elétrica, outros fatores relacionados à anisotropia da madeira também produzem efeitos significativos, entre os quais podem ser citados: os extrativos, constituintes minerais e densidade da madeira.

A variabilidade da madeira com respeito às quantidades relativas de celulose, hemicelulose e lignina tem também efeito na desorção de umidade e portanto influi na condutividade elétrica da madeira, SKAAR(1988).

VENKATESWARAM apud SKAAR (1988) observou que a condutividade elétrica da lignina isolada era da ordem de 10^{-13} mho/cm sendo bem maior que a da madeira seca que é em torno de 10^{-15} a 10^{-16} mho/cm. VERMAAS apud SKAAR(1984) verificou que o teor de umidade cresce com aumento do teor de lignina.

LANGWIG apud SKAAR(1988) concluiu que a condutividade elétrica da madeira é proporcional ao teor de íons presente em sua estrutura. Além disso, extrativos orgânicos (não solúveis) também podem afetar a condutividade da madeira, pois são péssimos condutores de eletricidade. Todavia, extrativos solúveis em água podem ter

o efeito oposto, particularmente em teores de umidade mais altos , pois estes podem conter eletrólitos.

Um modelo para condução iônica foi proposto por LIN apud KOLLMANN & CÔTÉ (1984) para explicar a condução elétrica através das paredes das células da madeira. Ele mostrou que o número de portadores de carga é o fator que mais afeta o mecanismo de condução e que isso ocorre na região de 0 a 20% do teor de umidade da madeira. Com um alto teor de umidade, o grau de dissociação de íons absorvidos é suficientemente alto, tornando-se, então, o fator mais significativo na determinação da condutividade elétrica. Portanto, qualquer mudança na concentração ou distribuição dos íons ou ambos pode alterar a condutividade elétrica da madeira.

Medidas da condutividade elétrica da madeira e derivados celulósicos por meio de corrente contínua foram realizadas por diversos pesquisadores utilizando vários métodos. STAMM apud KOLLMANN & CÔTÉ (1984) demonstrou a importância da determinação da condutividade elétrica de materiais celulósicos para se obter um bom contato elétrico. A configuração do eletrodo também interfere na medida de resistividade da madeira pois a camada mais superficial (resistência maior) domina a leitura do medidor, no caso de se usar eletrodo de contato superficial, SKAAR(1988). Por isso recomenda-se a utilização de eletrodos de penetração em medidores de umidade do tipo resistência, porque nesse caso a leitura obtida será referente às camadas mais úmidas da madeira.

Segundo JAMES (1988), uma amostra de madeira de seção retangular que sofreu secagem uniforme terá uma distribuição de umidade tal que para a profundidade de $1/4$ a $1/5$ de sua espessura, o teor de umidade será aproximadamente igual a média para a seção inteira. Para uma seção circular a profundidade terá de ser em torno de $1/6$ do diâmetro, e o eletrodo tipo pino que atingir essa profundidade indicará um teor de umidade médio.

A pressão de contato pode reduzir a resistência elétrica entre o eletrodo e a superfície da madeira, melhorando significativamente o desempenho do medidor. A resistência de contato tende a aumentar com o tempo, particularmente se a secagem ocorrer depois da introdução dos eletrodos na madeira SKAAR(1988).

De acordo com SKAAR (1988), a forma e dimensão da amostra determinam o tipo de eletrodo que será usado para medir a resistência. No caso da amostra possuir espessura fina recomenda-se utilizar eletrodos de placas planas localizados em faces opostas da amostra, pois a distribuição de umidade nesse caso é essencialmente uniforme na direção da espessura, como o do tipo circular utilizado na amostra da Fig 14.

A variação da tensão, na qual as medidas são feitas, afeta também as leituras da resistência elétrica. TAKESHI & INOVE apud KOLLMANN & CÔTÉ (1984) observaram que leituras de resistências com tensão acima de 30 volts são aproximadamente constante.

3.1 Movimento de água na madeira

A estrutura anatômica e propriedades físicas e mecânicas da madeira têm muita influência no seu processo de secagem, possibilitando uma maior ou menor facilidade no movimento de água no seu interior, PONCE & WATAI(1985).

De acordo com GALVÃO & JANKOWSKY (1984), a água existente no interior da madeira em forma de vapor pode ser desprezada devido à sua baixa densidade em relação à água higroscópica e capilar.

O teor de umidade verde é definido por SKAAR (1988) como a umidade na árvore no instante em que ela é abatida, e esse teor varia entre espécies, entre cerne e alburno na mesma árvore e, entre troncos cortados de diferentes alturas, além de variar com a estação do ano e com árvores de mesma espécie.

A movimentação de água na madeira se dá por meio de vasos nas angiospermas, pelos traqueídeos axiais e transversais nas gimnospermas, e pelos raios em ambas, BURGUER & RICHTER(1991).

Em coníferas de acordo com SIAU(1971), 93% do volume da madeira é constituído por traqueídeos axiais dispostos longitudinalmente, com um centro oco e geralmente vazio, no qual os fluídos podem penetrar no lume diretamente pelas extremidades afiladas e se movimentar livremente na madeira, passando para os traqueídeos adjacentes através das pontuações areoladas.

Já nas folhosas os vasos podem ser de 5 a 60 por cento do volume da madeira e constituem normalmente o caminho do fluxo de menor resistência, possuindo extremidades abertas de tal maneira que a penetração dos fluídos ao longo das fibras de algumas espécies de dicotiledôneas se dão de maneira muito mais rápida, SIAU(1971).

O processo de secagem da madeira envolve a evaporação de umidade da sua superfície e isto normalmente ocorre quando se fornece calor à madeira. A umidade existente no interior da madeira gradualmente se move para a superfície, onde o teor é relativamente menor. A secagem da madeira é um processo relativamente lento que pode levar dias ou meses dependendo da espécie, da densidade, e do tipo de secagem a ser utilizado.

Uma peça de madeira exposta à condição de temperatura e umidade relativa do ar constante por um longo período, desorve ou adsorve umidade dependendo de sua condição original de higrometricidade e, finalmente, retêm uma certa quantidade de umidade. Isso é chamado de teor de umidade de equilíbrio, TSOU MIS(1991).

A camada exterior da madeira responde mais rapidamente à mudança do clima que a camada interna. Geralmente a alteração na temperatura e umidade em um dia não causará mudança interna no teor de umidade, mas isso depende também da espécie de madeira a ser analisada, TSOU MIS(1991).

3.2 Métodos de determinação do teor de umidade da madeira

Para se determinar o teor de umidade da madeira, existem vários métodos distintos: estufa ou gravimétrico; destilação; titulação e medidores elétricos do tipo resistência e do tipo dielétrico, KOLLMANN & CÔTÊ (1984).

Os métodos de destilação e de titulação são os mais usados em laboratórios sendo que os demais, pelas indústrias.

O método da estufa é de fácil execução, necessitando apenas de uma estufa e de uma balança de precisão. Esse método implica na pesagem da amostra úmida e secagem em estufa à $(103 \pm 2)^{\circ} \text{C}$ até que sua massa permaneça constante. Para peças de madeira que possuem altos teores de resinas, óleos, gorduras ou materiais voláteis, esse método é considerado menos preciso, além de destruir parte da amostra, JAMES(1988).

O princípio utilizado no medidor elétrico de resistência é o da lei de ohms onde a diferença de potencial aplicada entre dois pontos provoca uma corrente proporcional à queda de tensão na madeira, sendo que a constante de proporcionalidade é a resistência.

No caso de constante dielétrica, MILOTA(1996) sugere que existe diferença de leitura no medidor do tipo capacitância, mesmo para uma espécie já calibrada. Isto ocorre pois existe uma diferença entre os valores da densidade básica utilizada pelo fabricante e a utilizada pelo experimentador.

3.3 Medidores de teor de umidade do tipo resistência

Os medidores de umidade do tipo resistência são essencialmente ohmímetros cujas escalas são calibradas em teores de umidade.

Devido à existência de diferenças entre as espécies, ou mesmo dentro de uma mesma espécie, tornam-se necessários ajustes nos medidores.

O medidor de umidade mais antigo era conhecido como medidor blinker de umidade. Foi produzido em 1930, e os amplificadores incorporados a ele eram valvulados, tornando-se instrumentos de grandes dimensões, SKAAR(1988).

Atualmente os amplificadores utilizados nos medidores são do tipo de estado sólido e por isso possuem dimensões reduzidas. Alguns desses equipamentos permitem ajustes relacionados a espécies ou conjuntos de espécies com correção de temperatura.

Os medidores do tipo resistência utilizam eletrodos de penetração. Esses eletrodos são introduzidos na madeira fazendo circular por ela uma corrente elétrica entre dois pontos, MORAES(1988). O teor de umidade mais baixo que efetivamente pode ser registrado para a maioria desses instrumentos é da ordem de 6 à 7%, SKAAR(1988).

De acordo com SKAAR(1988), os medidores também são usados para monitorar a umidade durante o processo de secagem de peças de madeira. Neste caso os

eletrodos são colocados dentro da peça antes do início do processo de secagem, sendo que os sistemas automatizados possuem um microcomputador para acompanhar o processo de secagem de maneira ininterrupta.

3.4 Características principais da propriedade dielétrica da madeira

Nos medidores elétricos de capacitância, os eletrodos podem ser considerados como as placas paralelas de um capacitor, e o seu funcionamento baseia-se na variação da constante dielétrica da madeira em relação à umidade e à frequência. Estas relações estão representadas nas Figuras 3 e 4; KOLLMANN & CÔTÊ(1984).

Figura 3- Efeito do teor de umidade da madeira sobre a constante dielétrica em alta frequência KOLLMANN & CÔTÊ(1984).

Figura 4- Variação da constante dielétrica com o teor de umidade da espécie beech em diferentes frequências. KOLMANN & CÔTÉ(1984)

Pode-se considerar o capacitor como sendo um dispositivo útil para armazenar carga elétrica e energia, sendo este constituído por dois condutores isolados entre si, mas muito próximos e separados com ar ou qualquer outro material dielétrico, possuindo cargas elétricas iguais porém de sinais opostos (Figura 5).

Dielétricos são materiais não condutores que colocados entre placas condutoras aumentam a capacitância dessas placas. A constante dielétrica é uma medida de como a energia está armazenada no material, quando este estiver sob ação de um campo elétrico. A representação esquemática de um capacitor e de um dielétrico, pode ser observada na Figura 5.

Figura 5- Representação esquemática de um capacitor, CALISTER JR(1994)

a- O dielétrico é o ar

b- O dielétrico é um material qualquer

A madeira é um material natural que possui composição e estrutura complexa, sendo que através da interação de um campo elétrico e a madeira pode-se esclarecer as propriedades dielétricas desse material. A influência do campo elétrico sobre a madeira é muito forte, pois desenvolve-se uma corrente elétrica no material. Sob a ação de um campo elétrico, a madeira revela suas propriedades dielétricas, as quais são caracterizadas pela constante dielétrica relativa e pela perda dielétrica tangencial, TORGOVNIKOV(1991).

A constante dielétrica relativa de um material mostra como a força de interação entre as cargas elétricas em um dado meio é menor que àquela no vácuo. A constante dielétrica relativa da madeira é igual à razão entre a capacidade de um capacitor com a separação entre as suas placas feita de madeira, e a capacidade do capacitor com o vácuo entre as placas de mesma dimensão e forma. A constante dielétrica é uma medida de como a energia potencial elétrica está armazenada no material quando este é colocado em um dado campo elétrico, TORGOVNIKOV(1991).

A perda dielétrica tangencial da madeira é definida como a parte da potência aplicada à madeira que é absorvida pelo material sob a influência do campo elétrico, sendo que parte da potência é transformada em energia térmica. A perda tangencial é numericamente igual à razão entre a corrente ativa e a corrente reativa no material ou à razão entre a potência real e a potência reativa, TORGOVNIKOV(1991).

Uma outra propriedade utilizada é o fator de perda dielétrica que é definida como o produto entre a constante dielétrica relativa e a perda dielétrica tangencial, TORGOVNIKOV(1991).

Os valores da perda tangencial e do fator de perda dielétrica são adimensionais, ou seja, não dependem da escolha do sistema de unidade ou da forma da equação.

Para a caracterização dessas propriedades deve-se submeter a amostra a um campo elétrico proveniente de um oscilador de baixa perda, a potência absorvida pela

amostra reduz a amplitude de oscilação, que é registrada pelo medidor, JAMES (1988).

Como a perda depende do teor de umidade, a leitura pode ser feita como percentagem desse teor, JAMES (1988).

Usando a relação entre o teor de umidade da amostra e sua perda dielétrica pode-se calibrar o instrumento. Esse tipo de equipamento é pouco utilizado na prática devido ao seu alto custo e por apresentar grande variabilidade nas leituras, JAMES (1988).

3.5 Polarização da Madeira

Todos os materiais podem ser divididos em três grupos elétricos: condutores , semicondutores e dielétricos. Os condutores são caracterizados como materiais que possuem valores consideráveis de condutividades eletrônicas e iônicas. Os dielétricos diferem dos condutores por sua condutividade específica baixa e também por possuírem um coeficiente de temperatura de sua resistência elétrica negativa, enquanto aquela dos condutores são positivas, TORGOVNIKOV(1991).

Os semicondutores ocupam uma posição intermediária entre os condutores e os dielétricos com relação à condutância. No tocante à temperatura, os semicondutores estão mais próximos dos dielétricos de que dos condutores, TORGOVNIKOV(1991).

Assume-se que os condutores tem uma resistência específica na região de 10^{-8} até 10^{-5} Ohm $\times$ m, semicondutores na região de 10^{-6} até 10^{-9} Ohm $\times$ m e os dielétricos na região de 10^{+7} até 10^{+17} ohms $\times$ m, TAREEV apud TORGOVNIKOV (1991). A madeira seca em estufa possui resistência específica entre 10^{+13} até 10^{+15} ohm $\times$ m e pode ser classificada como um dielétrico polar tanto quanto a madeira úmida, TORGOVNIKOV(1991).

Quando o teor de umidade aumenta, a resistência específica da madeira torna-se menor e sua condutividade se aproxima daquela dos materiais semicondutores, e quando o teor de umidade excede o ponto de saturação das paredes das células, a madeira pode ter uma condutividade iônica, TORGOVNIKOV(1993).

Sob a influência de um campo elétrico, a propriedade elétrica da madeira pode ser definida pelo processo de polarização predominante devido à interação entre as moléculas que compõe a madeira e o campo externo, TORGOVNIKOV (1991).

Uma importante propriedade intrínseca à madeira é a sua predisposição em ser polarizada. O efeito da polarização é causado pela mudança no arranjo espacial das partículas carregadas eletricamente da madeira sob a ação de um campo elétrico externo. Nessa condição, a madeira adquire um momento elétrico, TORGOVNIKOV(1991).

Para examinar teoricamente essa propriedade da madeira utiliza-se de um volume elementar. Este volume deve manter as características mínimas da madeira.

SUBOLEV apud TURGOVNIKOV (1991) propôs que elemento com dimensão acima de 0,1 mm podem ser considerados como elementos macro-estruturais da madeira. De acordo com essa sugestão, a essa categoria podem estar incluídos elementos com camadas de madeira de primavera e de verão, raio de largura média e grande, canais com resinas grandes e vasos grandes. Nesse caso, podemos supor que o volume elementar não pode ser menor que $1,0 \text{ cm}^3$. Esse volume deve conter uma quantidade suficiente de macrolementos e a propriedade física da amostra refletirá não somente as propriedades das micros estruturas mas também as propriedades dos macro elementos, TORGOVNIKOV(1991).

A influência de um campo elétrico externo causa o ordenamento das cargas moleculares na madeira, e nesse caso ela fica submetida a um momento elétrico igual a soma geométrica ($\sum \bar{p}$) do momento de todas as moléculas polarizadas que constituem o volume da madeira. No caso mais simples quando o campo é uniforme a polarização $\bar{P}$ é o valor do somatório do momento do dipolo de volume unitário ($\bar{P} = \sum \bar{p} / v$), TORGOVNIKOV (1991).

De acordo com TORGOVNIKOV(1991), a intensidade de polarização dielétrica depende do campo elétrico $\bar{E}$, e essa dependência pode ser expressa através da seguinte equação:

$$\bar{P} = \chi \epsilon_0 \bar{E} \quad (1)$$

onde:

χ - susceptibilidade elétrica (adimensional);

ϵ_0 - constante dielétrica do ar = $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$;

$\bar{E}$ - vetor campo elétrico (V/m).

A polarização da madeira pode ser expressa em termos de sua constante dielétrica relativa ϵ' , sendo que o produto $\epsilon_0 \times \epsilon'$ é chamado de constante dielétrica absoluta possuindo unidades em F/m. O deslocamento elétrico é definido como:

$$\overline{D} = \epsilon_0 \overline{E} + \overline{P} \quad (2)$$

Considerando um material isotrópico, a direção do vetor campo elétrico $\overline{E}$ e do vetor polarização $\overline{P}$ coincidem. A conexão entre a constante dielétrica relativa e a susceptibilidade elétrica χ é expressa na forma da equação 3:

$$\epsilon' = 1 + \chi \quad (3)$$

então:

$$\overline{P} = (\epsilon' - 1) \epsilon_0 \overline{E} \quad (4)$$

O momento dipolar do volume unitário do material pode ser representado como um resultado da ação aditiva de "N", momento do dipolo elementar, " $\overline{P}$ " que é proporcional ao campo elétrico local $\overline{E}'$, VON HIPPEL apud TORGOVNIKOV (1991).

então:

$$\overline{P} = a N \overline{E}' \quad (5)$$

onde:

a = fator de proporcionalidade ($F \times m^2$)

N = quantidade de momento dipolar;

$\bar{E}'$ = campo elétrico local (V/m)

Os parâmetros anteriormente definidos são necessários para o estudo da polarização em função da frequência, temperatura, estado de agregação da madeira, etc. A polarização total pode ser expressa como a soma de todos os tipos de polarização, NETUSHII apud TORGOVNIKOV (1991). A polarização total inclui cinco espécies de polarização, cuja expressão é:

$$P = P_e + P_a + P_d + P_v + P_z \quad (6)$$

onde:

P_e = polarização eletrônica;

P_a = polarização iônica (atômica);

P_d = polarização dipolar (orientacional);

P_v = Polarização interfacial (estrutural);

P_z = polarização eletrolítica.

A seguir estão apresentadas, de maneira sucinta as definições relativas a cada espécie de polarização.

⇒ Polarização eletrônica - surge como resultado da mudança das órbitas dos elétrons relativa ao núcleo, sob a influência de um campo elétrico externo. Esse tipo de polarização se estabelece em um tempo muito pequeno após a aplicação do campo, em torno de 10^{-14} a 10^{-16} segundos, e por isso ele independe da temperatura e da frequência do campo, e não está relacionado com a perda de energia, TORGOVNIKOV(1991).

⇒ Polarização iônica - surge como resultado de um deslocamento elástico de átomo nas moléculas e também por causa do deslocamento mútuo de íons carregados de sinais opostos. Os centros das cargas positivas e negativas que antes da aplicação do campo coincidiam são separados e então as cargas adquirem momento elétrico. A polarização cresce com o aumento da temperatura, que provoca a separação dos íons e diminui a força de interação entre eles. O tempo para se estabelecer esse tipo de polarização é da ordem de 10^{-13} a 10^{-12} segundos, TORGOVNIKOV(1991).

⇒ Polarização dipolar - consiste na rotação da molécula do dipolo na direção de um campo elétrico externo. O efeito desse tipo de polarização é criado por orientação da molécula do dipolo que produz um movimento térmico randômico. Esse tipo de polarização se manifesta em gases, líquidos e substâncias amorfas, e também está presente em alguns cristais, TORGOVNIKOV(1991).

As macro - moléculas como a celulose, hemicelulose e lignina, em conjunto, fazem as paredes da cavidade da madeira sofrerem ação da polarização dipolar. Esse processo está condicionado ao deslocamento de grupos polares como OH e CH₂OH, que não se movem das macro moléculas. Esse tipo de polarização é chamado de polarização dipolo radical, TORGOVNIKOV(1991).

O processo de aumento ou diminuição gradual da polarização do material, e que está relacionado ao aumento ou diminuição do campo elétrico, é chamado de relaxação dielétrica. Após a remoção do campo, a polarização dipolar é alterada por um movimento térmico das moléculas, e o seu valor diminui de acordo com a lei

exponencial, TORGOVNIKOV(1991). A expressão a seguir apresentada representa a lei exponencial em questão.

$$Pd(\tau) = Pd(0)\exp(-\tau/\tau_0) \quad (7)$$

onde:

$Pd(0)$ = nível de polarização no momento em que o campo é removido (Coulomb/m²);

τ_0 = constante de tempo de polarização que diminui no processo (tempo de relaxação em segundos);

τ = tempo em qualquer instante (segundos).

Tempo de relaxação é o intervalo de tempo necessário para o nível de polarização dielétrico diminuir de 2,72 vezes do valor inicial, após a remoção do campo. Frequentemente τ_0 varia de 10^{-6} a 10^{-12} segundos, e por isso esse tipo de polarização se manifesta em frequências inferiores a 10^{12} Hz, e seu valor aumenta consideravelmente com a diminuição da temperatura. A polarização dipolar causa uma dissipação da energia elétrica em forma de calor, TORGOVNIKOV(1991).

⇒ Polarização interfacial - ocorre em materiais dielétricos com diferentes propriedades. A madeira úmida é um material heterogêneo composto de substâncias sólidas, líquidas e gasosas. A fase sólida consiste de paredes das células da madeira cuja superfície absorve umidade. A cavidade é parcialmente preenchida com ar e

vapor, e se a quantidade de umidade excede o ponto de saturação das fibras, as cavidades se tornam cheias com água, TORGOVNIKOV(1991).

Por causa da diferença de potencial de contato entre a água e a parede da célula, as moléculas de água assumem um sinal e as paredes da célula assumem sinal oposto, sendo que a parede da célula tem condutividade elétrica bem menor que a água. Sob a ação de um campo elétrico, o elemento de volume recebe um momento dipolar.

Figura 6 - Representação de um diagrama da seção transversal das células das paredes da madeira TORGOVNIKOV(1991)

onde:

- 1 - paredes da célula;
- 2 - tubo de micro capilaridade;
- 3 - cavidade da célula;
- E - campo elétrico externo.

Em "b" podemos observar o resultado da polarização na madeira devido ao campo elétrico. A heterogeneidade estrutural da madeira resulta em um deslocamento limitado das cargas sendo que os íons dissociados presentes na água da cavidade da

célula mudam sua posição, e sob a influência do campo imposto polarizam a água, TORGOVNIKOV(1991).

No instante da imposição, o momento dipolar médio do volume unitário, o qual caracteriza a polarização interfacial P_v , aumenta gradualmente na madeira úmida, e a constante de tempo da polarização interfacial varia de 10^{-3} até 10^{-8} segundos.

Em materiais úmidos, a aplicação de uma tensão cc causa um processo de eletrólise devido ao deslocamento de íons dissociados, e nesse caso o material apresenta uma polarização residual ou eletrolítica, TORGOVNIKOV(1991).

Com o aumento do campo elétrico observa-se um incremento da polarização eletrolítica. Mas esse crescimento é bem menor que o de outros tipos de polarização, e a constante de tempo varia em torno de 10^{-4} até 10^{-2} segundos, TORGOVNIKOV(1991).

Sob a ação de um campo elétrico aparecem todos os tipos de polarização e, dependendo da frequência, cada uma delas contribui de forma diferente na polarização da madeira, TORGOVNIKOV(1991).

A polarização geral da madeira "P" pode ser considerada como composta de duas componentes: polarização instantânea " P_i " e polarização de relaxação " P_r ". Dessa forma, pode-se definir "P" como a soma de " P_i " e " P_r ". A polarização " P_i " segue imediatamente após a mudança da intensidade do campo elétrico. As polarizações dipolar interfacial e eletrolítica constituem as componentes da polarização de

relaxação " P_r " da polarização geral, atrasando a mudança do campo elétrico, TORGOVNIKOV(1991).

Figura 7 - Representação esquemática do aumento instantâneo da polarização após um incremento no campo elétrico TORGOVNIKOV(1991)

O circuito equivalente para a madeira como material dielétrico pode ser representado por um modelo no qual as diferentes polarizações estão presentes através de vários capacitores " C " e resistores " R ", TORGOVNIKOV(1991).

Na figura 8, " R_1 " representa a resistência da madeira à passagem de corrente cc.

Figura. 8 - Circuito equivalente da madeira como dielétrico com diferentes tipos de polarização, TORGOVNIKOV(1991)

Na figura 8, " C_e ", " C_a ", " C_d ", " C_v " e " C_z " representam valores de capacitância dos tipos de polarização já descritos. " R'_d ", " R_v " e " R_z " representam resistores equivalentes à perda de energia nas polarizações dipolar, interfacial e eletrolítica, respectivamente.

Pode-se notar que todas as polarizações contribuem igualmente para a polarização geral da madeira, e que, dependendo da frequência, algum tipo de polarização poderá ser desprezada no modelo.

Na região de 10^5 a 10^{10} Hz, a influência da polarização eletrolítica e das polarizações eletrônica e iônica é imperceptível, prevalecendo a ação da dipolar e da interfacial. Como a madeira contém umidade em várias formas e estados e, como as substâncias que compõem as paredes de suas células são diferentes, as moléculas dessas substâncias e da água possuem tempos diferentes de relaxação, TORGOVNIKOV(1991).

A constante dielétrica da madeira serrada na região média da densidade específica e na condição seca em estufa varia entre 1,8 e 3,0 para peças planas nas quais a direção do campo é radial aos anéis de crescimento. Quando o campo é dirigido ao longo da fibra, o valor de " ϵ " torna-se 30 a 60 por cento maior do que quando perpendicular a ela, KOLLMANN & CÔTÉ(1984).

O fator de potência usualmente aumenta com o crescimento do teor de umidade, mas o efeito contrário pode ocorrer em combinações de teor de umidade, temperatura e frequência. O fator de potência é uma função não linear da umidade, temperatura e frequência, e exibe valores máximos e mínimos em várias combinações daquelas variáveis, JAMES (1988).

A densidade afeta diretamente a constante dielétrica, fazendo-a variar quase linearmente, quando o teor de umidade cresce. O fator de potência da madeira aumenta com o crescimento da densidade, mas dependendo do valor atingido pela densidade ele cresce levemente, JAMES(1988).

Como o fator de perda é um produto de dois fatores que crescem com a densidade, este também aumentará com o incremento da densidade. A constante dielétrica também cresce com o aumento da temperatura, exceto em teores muito altos, JAMES(1988). O efeito contrário pode estar relacionado à diminuição do ponto de saturação das fibras em alta temperatura.

O aumento na constante dielétrica com o crescimento da temperatura indica que mecanismos termicamente ativados de polarização estão presentes. Esses mecanismos provavelmente são: a polarização interfacial, onde o campo elétrico externo produz portadores de cargas iônicas acumuladas na descontinuidade interna da madeira, e a polarização dipolar fixada, associada com a orientação de moléculas de celulosas devida ao campo externo, JAMES(1988).

Outros mecanismos de polarização, tal como momento dipolo molecular induzido, estão presente na madeira, mas são pouco influenciados pela temperatura. Muitas espécies com densidades aproximadamente iguais possuem propriedades elétricas semelhantes, mas existem exceções, JAMES(1988).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Espécies utilizadas na pesquisa

Neste trabalho foram utilizadas as seguintes espécies:

- *Pinnus elliottii* var. *elliottii* ;
- *Eucalyptus citrodora*;
- *Goupia glabra*;
- *Pouteria pachycarpa*;
- *Hyminaea* spp.

Estas espécies são amplamente utilizadas na indústria da construção civil.

4.2 Preparação dos corpos de provas

Foram utilizados inicialmente peças de madeira superiores a 1,0 metro de comprimento para cada uma das espécie em estudos. Foram retiradas quatro amostras do tipo R da parte central de cada meia peça. As amostras foram confeccionadas conforme o esquema apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Esquema de retirada das amostras para medidas do teor de umidade e da densidade básica. GALINA (1998).

onde:

R = amostra para se fazer a calibração do medidor;

Ui = amostra para determinação da umidade inicial;

Db = amostra para determinação da densidade básica.

Inicialmente as amostras foram colocadas por 30 dias imersas em água, e em seguida foram retiradas, cortadas, e pesadas para determinação de suas massas iniciais. Para cada uma das espécies, foram selecionadas quatro amostras para a determinação do teor de umidade, totalizando 20 corpos de provas.

Figura 10 - Tipologia das amostras utilizadas para a determinação do teor de umidade.

4.3 Determinação da umidade inicial

As amostras U_i foram colocadas em estufas por 48 horas, a uma temperatura de $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ até massa constante denominada de massa seca. Com os valores dessa massa seca pode-se determinar a umidade inicial, utilizando a equação (8).

$$T_{Ui} = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100\% \quad (8)$$

onde:

M_u = massa úmida (g);

M_s = massa seca(g);

T_{Ui} = teor de umidade inicial das amostras (%).

Considerou-se como umidade inicial das amostras “R” a média das umidades das amostras “Ui” que foram retiradas da mesma peça conforme a Figura 9. Esse método é tradicionalmente utilizado na preparação de amostras de controles RASMUSSEM(1961).

Após essas considerações procedeu-se a secagem das amostras "R" a uma temperatura constante de $\pm 30^{\circ} \text{C}$, com uma umidade relativa de 65%, estabelecendo-se para cada umidade de interesse uma massa estimada através da equação 9.

$$T_a = \frac{P_{\text{atual}} (T_{\text{inicial}} + 100)}{P_{\text{inicial}}} - 100 \quad (9)$$

T_a = teor de umidade atual (%);

T_{inicial} = teor de umidade inicial calculado com base nas amostras Ui (%);

P_{inicial} = massa inicial das amostras R (g);

P_{atual} = massa atual das amostras R (g).

4.4 Medidor elétrico do tipo resistência

O medidor elétrico do tipo resistência utilizado foi um instrumento da marca Digisystem modelo DUP- 8805, cujo sensor é um eletrodo de penetração com quatro pinos. Esse equipamento é semelhante a um megahômetro com sensibilidade para altas resistências, e o seu funcionamento consiste em fazer passar pela madeira uma corrente elétrica, que dependendo do teor de umidade pode ser pequena para teores

de umidade baixos e, alta para teores de umidade elevados. Esse equipamento permite que sejam feitas leitura direta dos teores de umidade das peças em estudos, Figura 11.

Figura 11 –Medidor elétrico do tipo resistência utilizado na presente pesquisa

Esse equipamento possui três escalas visando permitir uma melhor adequação da calibração do fabricante à espécie a ser investigada, sendo:

- $L_1 \rightarrow$ escala indicada para madeira com densidade maior que $0,80 \text{ g/cm}^3$
- $L_2 \rightarrow$ escala indicada para madeira com densidade entre $0,50 \text{ g/cm}^3$ a $0,80 \text{ g/cm}^3$
- $L_3 \rightarrow$ escala indicada para madeira com densidade menor que $0,50 \text{ g/cm}^3$

4.5 Determinação do teor de umidade por meio de medidores elétricos de resistência

O método para se medir a umidade por meio de medidores elétricos de resistência consiste em cravar previamente na peça de madeira eletrodos de dois ou quatros

pinos, com $\frac{1}{3}$ de profundidade em relação à espessura da amostra, e a três centímetros da extremidade no sentido paralelo às fibras, Figura 12.

Figura 12 - Colocação dos eletrodos paralelos às fibras a uma profundidade de $\frac{1}{3}$ da espessura da amostra

4.6. Tipos de eletrodos utilizados em medidores elétricos de resistência

Existem dois tipos de eletrodos: o de dois pinos e o de quatro pinos. O medidor utilizado na presente pesquisa possui eletrodo de quatro pinos. Geralmente as tabelas de correções são baseadas em medidores que possuem eletrodos de dois pinos, porque quase todos os medidores do tipo resistência usados em indústrias de madeira são do tipo de dois pinos. Não existem vantagens em se usar eletrodos de quatro pinos. Leituras com eletrodos de quatro pinos são mais altas e requer menor fator de correção que aquela de dois pinos. A relação entre leitura de medidas feitas com eletrodos de dois pinos com aquelas feitas com eletrodos de quatro pinos são mostradas na Figura 13, PFAFF & GARRAHAN(1984)

Figura 13 -Relação entre leituras de medidores com 2 e 4 pinos para medidores de umidade do tipo resistência. PFAFF & GARRAHAN (1984)

4.7 Determinação dos teores de umidade durante o processo de secagem

Após a preparação inicial (corte, imersão em água e pesagem), as amostras foram submetidas a um ciclo de secagem e medições, até que o teor de umidade atingisse o valor de aproximadamente 12%.

O processo de determinação dos teores de umidade foi realizado segundo as seguintes etapas:

- pesagem das amostras para medida de umidade atual;
- estimativa do teor de umidade por meio da determinação massa;
- leitura no medidor de umidade do tipo resistência.

Atingido um teor de umidade em torno de 12% as amostras foram secas a $(103 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ até sua massa atingir valor constante.

4.8 Espécies utilizadas para a determinação da constante dielétrica

Para a determinação da constante dielétrica foram utilizadas duas espécies:

- *Eucalyptus citrodora*;
- *Pinnus elliotti* var. *elliotti*.

As amostras foram retiradas de peças de madeira e posteriormente cortadas para serem aproveitadas em eletrodos de contato superficial de forma circular conforme esquema da Figura 14.

Figura 14- Esquema da amostra utilizada para medidas com eletrodos de contato superficial para cálculo de constante dielétrica.

Após a preparação das amostras efetuou-se a pesagem das mesmas, seguindo o mesmo procedimento do item 4.7.

4.9 Equipamento utilizado para medida de constante dielétrica

Para as medidas de constante dielétrica foi utilizado um equipamento chamado impedancímetro, da marca Solartron Modelo 1260 Impedance/Gain Phase Analyser, ligado a um estabilizador de tensão de 1 KVA e a um filtro de linha, cujo funcionamento dependeu da utilização de um porta-amostra. Este aparelho foi controlado por um microprocessador que permitiu a obtenção dos valores de impedância, capacitância e indutância da amostra em função da frequência do potencial elétrico oscilante, no qual as grandezas a serem medidas foram obtidas pela defasagem entre o potencial aplicado e a corrente que fluiu pelo material. As especificações do instrumento permitiram uma amplitude máxima de 3V e o intervalo de frequência de $10\mu\text{Hz}$ a 10MHz . O equipamento também foi conectado a um microprocessador por meio de uma placa de comunicação IEEE488 GPIB, facilitando a aquisição de dados experimentais. A figura, a seguir apresentada, permite uma visão frontal desse equipamento.

Figura 15- Impedancímetro utilizado para medida da constante dielétrica

O eletrodo utilizado para esse tipo de medida foi do tipo inox, de contato superficial, possuindo a mesma forma das amostras.

Após a preparação inicial (corte, pesagem, imersão em água), as amostras foram submetidas a ensaios preliminares.

Esses ensaios foram conduzidos da seguinte maneira:

- pesagem das amostras para determinação da massa úmida corrente;
- colocação das amostras em porta amostra para medidas por meio do equipamento solartron
- varredura em frequências para determinação da constante dielétrica.

Com a realização desses ensaios foi possível obter a constante dielétrica em função da frequência produzida por um campo elétrico que variou de 10^{-2} a 10^6 Hz.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentadas e discutidas as análises referentes à determinação do teor de umidade por meio de medidores do tipo resistência e suas relações com os valores do teor de umidade obtidos por meio da estufa, para cada uma das espécies em estudo.

5.1 Determinação do teor de umidade da madeira por meio de equipamento do tipo capacitância

Com relação às medidas realizadas com o equipamento de capacitância pode-se afirmar que estas provavelmente foram afetadas por fatores como: pressão de contato dos eletrodos com a amostra (a pressão não foi suficiente para diminuir a resistência entre eles); superfície da amostra irregular, de maneira a reduzir a superfície de contato entre o eletrodo e a amostra. Na Figura 16 tem-se dois gráficos da constante dielétrica contra a frequência. No gráfico "a" tem-se a curva obtida na experimentação, e no gráfico "b" estão apresentadas as medidas determinadas por TORGOVNIKOV (1991). Em "b" tem-se as polarizações anteriormente descritas, onde ϵ' é igual ao produto da constante dielétrica do ar (ϵ_0) pela constante absoluta da madeira (ϵ).

FIGURA16-Relação entre constante dielétrica e logaritmo da frequência. (a)- medidas feitas com o medidor de capacitância. (b)- medidas realizadas por TORGOVNIKOV (1991).

Em função dos resultados preliminarmente obtidos, não houve continuidade na experimentação com o medidor do tipo capacitância, pois os valores assim obtidos não permitiam a efetiva determinação do teor de umidade, e comparação com valor obtido por meio da estufa. Além disso, o equipamento do tipo capacitância não permite a obtenção expedita do teor de umidade de peças de madeira.

5.2 Valor da massa específica para as espécies em estudo

Para cada uma das espécies em estudo determinou-se a massa específica básica e aparente, conforme as recomendações da NBR 7190/97. Na tabela 1, estão apresentados os valores obtidos para a massa específica das espécies em estudo.

Tabela 1- Massa específica para as espécies em estudo

Espécie	ρ_{bas} (kg/m ³)	ρ_{ap} (kg/m ³)	$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)
Goupia glabra	635	1146	780
Pouteria pachycarpa	699	939	810
Eucalyptus citriodora	787	1202	1020
Hymenea spp	749	1037	885
Pinus elliotti var. elliotti	472	1062	530

Segundo a NBR 7190/97, as espécies utilizadas na presente pesquisa possuem os seguintes valores médios para resistência à compressão paralelas as fibras:

- ⇒ Goupia Glabra (Cupiuba): $f_{c0} = 54,4\text{MPa}$;
- ⇒ Pouteria pachycarpa(Goiabão): $f_{c0} = 48,5\text{MPa}$;
- ⇒ Eucalyptus citriodora: $f_{c0} = 62,0\text{MPa}$;
- ⇒ Hymenea spp (Jatobá): $f_{c0} = 93,3\text{MPa}$;
- ⇒ Pinus elliotti var.elliotti: $f_{c0} = 40,4\text{MPa}$.

Esses valores médios permitem estimar a representação destas espécies dentro do sistema de classes de resistência (SALES,1996). Deste modo, pode-se enquadrar as espécies utilizadas no presente estudo nas seguintes classes de resistências:

- ⇒ Goupia glabra (Cupiuba): C30 (dicotiledônias);
- ⇒ Pouteria pachycarpa (goiabão): C30 (dicotiledônias);
- ⇒ Eucalyptus citriodora: C40 (dicotiledônias);
- ⇒ Hymenea spp (Jatobá): C60 (dicotiledônias);
- ⇒ Pinus elliotti var. elliotti: C25 (coníferas).

5.3 Valores dos teores de umidade obtidos para as espécies em estudo

Os valores médios das quatro medidas realizadas para a determinação do teor de umidade das espécies em estudo estão apresentadas na Tabela 2. Nessa tabela, pode-se observar também os valores médios obtidos com a utilização de cada uma das escalas existente no equipamento: L₁, L₂ e L₃.

Tabela 2-Valores médios dos teores de umidade obtidos por meio do método da estufa e pelo método do medidor elétrico do tipo resistência

ESPÉCIE	Teor de umidade real (%)	Teor de umidade observada no aparelho (%)		
		ESCALA L ₁	ESCALA L ₂	ESCALA L ₃
<i>Goupia glabra</i>	28,30	25,10	32,20	30,90
	23,70	23,08	30,38	30,72
	18,32	21,07	28,57	30,55
	14,98	13,60	17,10	20,72
	11,85	9,75	12,65	15,67
<i>Pouteria pachycarpa</i>	28,20	10,40	14,40	16,50
	22,30	8,80	12,40	14,30
	18,99	4,30	4,80	6,40
	15,70	0,00	0,70	3,30
	12,74	0,00	0,00	0,27
<i>Eucalyptus citriodora</i>	28,90	37,50	44,60	52,00
	24,20	27,90	34,10	39,30
	18,70	13,50	20,40	20,60
	15,80	11,50	15,30	18,60
	12,89	9,37	11,87	13,00
<i>hymenea spp</i>	29,80	13,00	16,55	21,00
	24,40	8,90	11,60	14,40
	18,32	4,80	6,65	7,40
	14,93	0,00	0,40	1,80
	12,88	0,00	0,05	0,10
<i>Pinus elliotti</i> var. <i>elliotti</i>	32,10	21,90	26,70	31,60
	19,50	18,35	22,70	26,90
	16,50	14,80	18,70	22,20
	11,40	10,40	13,20	16,30

5.4 Análise descritiva e gráfica

Esta análise tem como intuito verificar as possíveis relações entre os valores experimentais obtidos no desenvolvimento deste trabalho. Serão apresentados gráficos para cada uma das espécies estudadas.

5.4.1 Análise dos resultados obtidos para a espécie *Goupia glabra* (dicotiledônea C30)

O gráfico a seguir apresentado, representa a variação das leituras obtidas com o medidor elétrico, para a espécie *Goupia glabra*. Os valores apresentados na abscissa representam os teores de umidade obtidos por meio do método da estufa. Na ordenada, tem-se os valores obtidos com as leituras efetuadas com as três escalas do equipamento (L_1 , L_2 e L_3), correspondentes aos valores obtidos em estufa.

FIGURA17-Relação entre teor de umidade medido em estufa e as leituras dos teores de umidade medidos pelo equipamento.

Por meio da observação do gráfico pode-se afirmar que a reta que melhor se aproxima da condição de referência " L_4 " é a reta " L_1 ", e a leitura que apresentou

menor variabilidade foi a referente à escala 1 do medidor elétrico do tipo resistência (tabela 3). Para verificar estas variações foi utilizada a seguinte expressão:

$$\text{Variação } L_{1,2 \text{ ou } 3} = \left(\frac{\text{Teor de umidade real (estufa)} - L_{1,2 \text{ ou } 3}}{\text{Teor de umidade real}} \right) \times 100 \quad (10)$$

Tabela 3-Variação das leituras das escalas do equipamento em relação aos teores de umidade medidos pelo método da estufa para *Goupia glabra*

Teor de umidade real (%)	variação em L ₁ (%)	variação em L ₂ (%)	variação em L ₃ (%)
28,30	3,2	4,4	2,6
23,70	0,62	7,08	7,02
18,32	2,75	10,25	12,23
14,98	1,38	2,12	5,74
11,75	2,1	0,8	3,82
variação média	2.01	4.93	6.28

Portanto, a escala que por meio da análise descritiva e gráfica apresentou valores mais verossímeis em relação ao teor de umidade real foi "L₁".

Com o intuito de verificar a validade dos parâmetros de correção a serem definidos para o equipamento em questão, foi realizada uma análise de regressão linear para a escala "L₁" utilizada na determinação do teor de umidade das amostras de *Goupia glabra*.

5.4.1.2 Análise de regressão linear da escala "L₁" para a espécie *Goupia glabra* (dicotiledônea C30)

Neste item é apresentada a verificação da relação entre o teor de umidade real e o teor de umidade determinado com o uso do medidor elétrico na escala "L₁" para *Goupia glabra*.

Foi desenvolvida uma relação que possibilita estimar os valores do teor de umidade real (U_{real}) a partir dos valores do teor de umidade determinado com o uso de medidor elétrico do tipo resistência. Inicialmente elaborou-se o gráfico de U_{L1} contra U_{real} apresentado na Figura 18.

FIGURA18-Relação entre a leitura do medidor na escala L₁ e o teor de umidade medido pela estufa.

Nesse gráfico observa-se que, para um acréscimo na variável independente, pode existir um acréscimo na variável resposta. É possível a existência de uma correlação linear positiva nesta relação, mas esta deve ser determinada na regressão linear a

Tabela 4-Análise de variância para os resultados obtidos com a espécie *Goupia glabra*

Fonte de variação	Soma de Quadrados	Graus de liberdade	quadrado médio	F _{dados}	F ₀₅
Devido à regressão	155,44	1	155,44	23,37	10,13

A análise de variância desenvolvida permite comparar os dados de U_{real} e U_{L1} , ao nível de 5% de significância. Como o valor da variável de teste $F_{\text{dados}} = 23,37$ é superior ao valor crítico $F_{0,5} = 10,13$, não se deve rejeitar a hipótese nula H_0 , ou seja, fica estatisticamente evidenciada a existência de dependência linear ao nível de $\alpha = 5\%$.

Utilizando os valores da análise de variância obtém-se os parâmetros estimados para a regressão linear em questão, os quais estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5-Coeficiente de regressão para a relação entre U_{real} e U_{L1} para a espécie *Goupia glabra*

Variável	coeficiente	t _{dados}	t ₀₅
constante	1,81	0,47	3,182
U_{real}	0,951	4,83	
n = 5	$r^2 = 0,886$		

Os coeficientes apresentados na tabela 5 são significativos e permitem afirmar o quanto da variação de U_{real} pode ser explicado por U_{L1} .

O valor de $t_{\text{dados}} = 4,83$ é superior ao valor crítico de $t_{0,5} = 3,182$, permitindo verificar o que ocorre com U_{real} no caso de um incremento em U_{L1} . Continuando a análise avaliou-se o gráfico dos resíduos contra os valores U_{real} , apresentado na Figura19, visando verificar a ocorrência de violações sérias nas suposições do modelo proposto, ou seja, resíduo da regressão sem distribuição normal e variância variável.

FIGURA19-Gráfico dos resíduos contra os valores de U_{real} .

A partir do gráfico dos resíduos contra os valores U_{real} , observa-se que os resíduos apresentam uma distribuição aleatória em torno do zero, indicando que o modelo linear em estudo é satisfatório para a análise dos dados obtidos experimentalmente para *Goupia glabra*.

Portanto, o modelo de regressão obtido é significativo estatisticamente, sendo que a relação assim obtida permite explicar a variabilidade dos dados. A relação obtida neste modelo de regressão está a seguir apresentada.

$$U_{\text{real}} = 1,81 + 0,951U_{L1} \quad (11)$$

Cumprir observar que a retirada de pontos com resíduos elevados conduziram a resultados semelhantes para constatação da normalidade dos resíduos e sem a ocorrência de aumento significativo no r^2 e na F.

5.4.2. Análise dos resultados obtidos para a espécie *Pouteria pachycarpa* (dicotiledônea C30)

O gráfico a seguir apresentado, representa a variação das leituras obtidas com o medidor elétrico, para a espécie *Pouteria pachycarpa*. Na abscissa tem-se os teores de umidade medidos em estufa e na ordenada os teores de umidade obtidos com as leituras efetuadas com as três escalas do equipamento (L_1 , L_2 e L_3), correspondente aos valores obtidos em estufa.

FIGURA 20- Relação entre teor de umidade medido em estufa e as leituras dos teores de umidade medidos pelo equipamento.

Por meio de observação do gráfico pode-se afirmar que a reta que melhor se aproxima da condição de referência " L_4 " é a reta " L_3 ". A leitura que apresentou

menor variabilidade foi a referente à escala 3 do medidor elétrico do tipo resistência (tabela 6).

Tabela 6-Variação das leituras das escalas do equipamento em relação aos teores medidos pelo método da estufa para *Pouteria pachycarpa*

Teor de umidade real (%)	variação em L ₁ (%)	variação em L ₂ (%)	variação em L ₃ (%)
28,20	17,80	13,80	11,70
22,30	13,50	9,90	8,00
18,99	14,69	14,19	12,59
15,70	15,70	15,00	12,40
12,70	12,70	12,70	12,43
variação média	14,88	13,12	11,42

Com o intuito de verificar a validade dos parâmetros de correções a serem definidos para o equipamento em questão, foi realizada uma análise de regressão linear para a escala "L₃", utilizada na determinação dos teores de umidade das amostras de *Pouteria pachycarpa*.

5.4.2.1 Análise de regressão linear da escala L₃ para a espécie *Pouteria pachycarpa* (dicotiledônea C30)

Neste item estão apresentadas as verificações da relação entre os teores de umidade real e os teores de umidade determinados com o uso do medidor elétrico na escala "L₃". Foi desenvolvida uma relação que possibilita estimar os valores dos teores de umidade real (U_{real}) a partir dos valores dos teores de umidade determinados com o uso de medidor elétrico do tipo resistência. A Figura 21 apresenta o gráfico de $U_{\text{equip.}}$ contra U_{real} .

FIGURA 21-Relação entre a leitura do teor de umidade na escala "L₃" e o teor de umidade medido pela estufa

A partir dos dados pode-se construir o quadro de análise de variância apresentado na tabela 7

Tabela 7-Análise de variância para os resultados obtidos com a espécie *Pouteria pachycarpa*

Fonte de variação	Soma dos quadrados	graus de liberdade	Quadrado médio	F_{dados}	$F_{0,5}$
Devido à regressão	135,01	1	135,01	42,99	10,13

Pela tabela, verifica-se que a variável de teste $F_{\text{dados}} = 42,99$ é superior ao valor crítico $F_{0,5} = 10,13$ ficando evidenciada a existência de dependência linear ao nível de $\alpha = 5\%$.

Utilizando os valores da análise de variança obtêm-se os parâmetros estimados para a regressão linear em questão, os quais são apresentados na tabela 8.

Tabela 8-Coeficiente de regressão da relação entre U_{real} e U_{L3} para a espécie *Pouteria pachycarpa*

Variável	coeficiente	t _{dados}	t _{0,5}
constante	12,81	9,85	3,182
U _{real}	0,83	6,55	
n = 5	r ² = 0,934		

Pode-se observar que para a leitura " L_3 " o valor de $t_{\text{dados}} = 6,55$ é superior a $t_{0,5} = 3,182$, permitindo concluir o que ocorre com U_{real} no caso de um incremento em U_{L3} .

Avaliou-se também o gráfico dos resíduos contra os valores de U_{real} , e verificou-se que estes apresentam uma distribuição aleatória em torno de zero, indicando que o modelo linear em estudo é satisfatório para a análise de dados obtidos experimentalmente(Figura 22).

FIGURA 22- Gráfico dos resíduos contra os valores de U_{real} .

Portanto, o modelo de regressão obtido é significativo estatisticamente sendo que a relação assim obtida permite explicar a variabilidade dos dados. A relação obtida nesse modelo de regressão está a seguir apresentada.

$$U_{\text{real}} = 12,81 + 0,83U_{L3} \quad (12)$$

5.4.3 Análise dos resultados obtidos para a espécie *Eucalyptus citriodora* (dicotiledônea C40)

O gráfico a seguir apresentado, representa a variação das leituras obtidas com o medidor elétrico, para a espécie *Eucalyptus citriodora*. Os valores apresentados na abscissa representam os teores de umidade obtidos por meio do método da estufa. Na ordenada, tem-se os valores obtidos com as leituras efetuadas com três escalas do equipamento (L_1 , L_2 e L_3) correspondentes aos valores obtidos em estufa.

FIGURA 23-Relação entre teor de umidade medido em estufa e as leituras dos teores de umidade medidos pelo equipamento.

Pelo gráfico observa-se que a reta referente à leitura "L₁" é a que melhor se aproxima da condição de referência "L₄", como pode-se observar na tabela de variação (tabela 9).

Tabela 9-Variação das leituras das escalas do equipamento em relação aos teores medidos pelo método da estufa para *Eucalyptus citriodora*.

Teor de umidade real (%)	variação em L ₁	Variação em L ₂	variação em L ₃
28,90	8,60	15,70	23,10
24,20	3,70	9,90	15,10
18,70	5,20	1,70	1,90
15,80	4,30	0,50	2,80
12,89	3,52	1,02	0,11
variação média	5,06	5,76	8,6

Por essa tabela, pode-se concluir que a leitura "L₁" pode ser usada para as medidas de umidade, uma vez que apresenta valores menores de variação em relação às medidas em estufa.

5.4.3.1 Análise de regressão linear da escala "L₁" para a espécie *Eucalyptus citriodora* (dicotiledônea C40)

A Figura 24, apresenta o gráfico de U_{real} contra U_{L1}. Nesse gráfico observa-se uma correlação linear entre as duas variáveis.

FIGURA 24- Relação entre a leitura do teor de umidade na escala "L₁" e o teor de umidade medido pela estufa

A partir dos dados pode-se construir o quadro de análise de variância apresentado na tabela 10

Tabela 10.-Análise de variância para os resultados obtidos com a espécie Eucalyptus citriodora

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F _{dados}	F _{0,5}
	L ₁	L ₁	L ₁	L ₁	L ₁
Devido à regressão	159,83	1	159,83	69,99	10,13

Dessa tabela pode-se observar que o valor da variável de teste $F_{\text{dados}} = 69,99$ é superior ao valor crítico $F_{0,5} = 10,13$; ficando evidenciado estatisticamente a existência de dependência linear ao nível de $\alpha = 5\%$. Por meio da análise da variância obtém-se os parâmetros estimados para a regressão linear (tabela 11).

Tabela 11 Coeficiente de regressão para a relação entre U_{real} e U_{L1} para a espécie *Eucalyptus citriodora*

Variável	Coeficiente	t_{dados}	$t_{0,5}$
Constante	9,76	6,93	3,182
U_{real}	0,51	8,36	
N=5	$r^2 = 0,958$		

Os coeficientes apresentados na tabela 11 são significativos e permitem afirmar o quanto da variação de U_{real} pode ser explicado por U_{L1} . O valor de $t_{dados} = 8,36$ é superior ao valor crítico de $t_{0,5} = 3,182$, permitindo verificar o que ocorre com U_{real} no caso de um incremento em U_{L1} .

O gráfico dos resíduos contra os valores U_{real} apresentado na Figura 25, visa verificar a ocorrência de violações sérias nas suposições dos modelos propostos, ou seja, resíduos da regressão sem distribuição normal e variância variável.

FIGURA 25-Gráfico dos resíduos contra os valores de U_{real} .

Do gráfico dos resíduos contra os valores U_{real} observa-se que os resíduos apresentam uma distribuição aleatória em torno do zero, indicando que o modelo linear em estudo é satisfatório para a análise dos dados obtidos experimentalmente para *Eucalyptus citriodora*.

Portanto, o modelo de regressão obtido é estatisticamente significativo e permite explicar a variabilidade dos dados. A relação obtida neste modelo está apresentada a seguir:

$$U_{real} = 9,76 + 0,51U_{L1} \quad (13)$$

Cumpramos observar que a retirada de pontos com resíduos elevados conduziu a resultados semelhantes para constatação da normalidade dos resíduos e sem ocorrência de aumento significativo no r^2 e na F.

5.4.4 Análise dos resultados obtidos para espécie *Hymenea* ssp (dicotiledônea C60)

O gráfico a seguir apresentado, representa a variação das leituras obtidas com o medidor elétrico, para a espécie *Hymenea* ssp. Os valores apresentados na abscissa representam os teores de umidade obtidos por meio do método da estufa. Na ordenada tem-se os valores obtidos com as leituras efetuadas com as três escalas do equipamento (L_1, L_2 e L_3), correspondente aos valores obtidos em estufa. Nessa figura pode-se observar que a leitura correspondente a reta " L_3 " é a que mais se aproxima da reta de referência " L_4 ". A análise pela variação das leituras das escalas com a leitura da estufa, apresentada na tabela 12, confirma essa suposição.

FIGURA 26- Relação entre teor de umidade medido em estufa e as leituras dos teores de umidade medidos pelo equipamento.

Tabela 12-Variação das leituras das escalas do equipamento em relação aos teores de umidade medidos pelo método da estufa para *Hymenea ssp*

Teor de umidade real (%)	Variação em L ₁ (%)	Variação em L ₂ (%)	Variação em L ₃ (%)
29,80	16,80	13,25	8,80
24,40	8,90	12,80	10,00
18,32	13,52	11,57	10,92
14,93	14,93	14,53	13,13
12,88	12,88	12,83	12,78
Variação média	13,41	13,00	11,13

Portanto, a escala que por meio da análise descritiva e gráfica apresentou valores mais verossímeis em relação ao teor de umidade real foi a “L₃”.

5.4.4.1 Análise de regressão linear da escala L₃ para a espécie *Hymenea ssp* (dicotiledônea C60)

A Figura 27 apresenta o gráfico de U_{real} contra U_{L3}, no qual pode-se observar a possibilidade de uma correlação entre as duas variáveis.

FIGURA 27-Relação entre a leitura do teor de umidade na escala "L₁" e o teor de umidade medido pela estufa

A partir dos dados pode-se construir o quadro de análise de variância apresentado na tabela 13.

Tabela 13-Análise de variância para os resultados obtidos com a espécie *Hymenea ssp*

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F_{dados}	$F_{0,5}$
Devido a regressão	193,98	1	193,98	953,18	10,13

Nessa tabela observa-se que o valor da variável de teste $F_{\text{dados}} = 953,18$ é superior ao valor crítico $F_{0,5} = 10,13$, e pode-se concluir que fica evidenciada estatisticamente a existência de dependência linear ao nível de $\alpha = 5\%$. Utilizando os parâmetros obtidos por meio da análise de variância, encontra-se os parâmetros estimados para a regressão linear(tabela 14).

Tabela 14 Coeficiente de regressão para relação ente U_{real} e U_{L3} para a espécie *Hymenea ssp*

Variável	Coeficiente	t_{dados}	$t_{0,5}$
Constante	12,95	42,32	3,182
U_{real}	0,79	30,87	
$N = 5$			

Pode-se observar que $t_{\text{dados}} = 42,32$ é superior ao valor crítico $t_{0,5} = 3,182$, permitindo concluir o que ocorre com U_{real} no caso de um incremento em U_{L3} .

Avaliando o gráfico dos resíduos contra os valores U_{real} apresentado na Figura 28, pode-se observar que a partir dele os resíduos apresentam uma distribuição aleatória em torno do zero, indicando que o modelo linear em estudo é satisfatório para a análise dos dados obtidos experimentalmente para a *Hyemenea ssp.*

FIGURA 28-Gráfico dos resíduos contra os valores de U_{real} .

Portanto, o modelo de regressão obtido é significativo estatisticamente, sendo que a relação assim obtida, permite explicar a variabilidade dos dados. A relação obtida neste modelo de regressão está a seguir apresentada.

$$U_{\text{real}} = 12,95 + 0,79U_{L3} \quad (14)$$

5.4.5 Análise dos resultados obtidos para a espécie *Pinus elliotti* var. *elliotti*

O gráfico a seguir apresentado, representa a variação das leituras obtidas com o medidor elétrico, para a espécie *Pinus elliottii* var. *elliottii*. Os valores apresentados

na abscissa representam os teores de umidade obtidos por meio do método da estufa. Na ordenada, tem-se os valores obtidos com as leituras efetuadas com as três escala do equipamento (L_1, L_2 e L_3), correspondente aos valores obtidos em estufa.

FIGURA 29-Relação entre teor de umidade medido em estufa e as leituras dos teores de umidade medidos pelo equipamento para *Pinus elliotti* var *elliotti*.

Nessa figura pode-se observar que a leitura referente a reta L_2 é a que mais se aproxima da leitura correspondente a reta de referência L_4 . Os dados apresentados na tabela 15 confirmam essa suposição.

Tabela 15-Variação das leituras das escalas do equipamento em relação aos teores de umidade medidos pelo método da estufa para *Pinus elliottii* var. *elliottii*

Estufa	L_1	L_2	L_3
32,10	10,20	5,40	0,50
19,50	1,15	3,20	7,40
16,50	1,70	2,20	5,70
11,40	1,00	1,80	4,90
variação média	3,51	3,15	4,63

5.4.5.1 Análise de regressão linear da escala L_1 para a espécie *Pinus elliottii* (conífera C25)

A Figura 30 apresenta o gráfico de U_{real} contra U_{L2} . Pode-se observar que é possível existir uma correlação linear entre as duas variáveis.

FIGURA 30-Relação entre a leitura do teor de umidade medido na escala " L_2 " e o teor de umidade medido pela estufa.

A partir dos dados de regressão pode-se construir o quadro de análise de variância apresentado na tabela 16.

Tabela 16-Análise de variância para os resultados obtidos com a espécie *Pinus elliotti* var. *elliotti*

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F_{dados}	$F_{0,5}$
Devido à regressão	204,88	1	204,88	14,67	10,13

Nessa tabela observa-se que o valor da variável de teste $F_{\text{dados}} = 14,67$ é superior ao valor crítico $F_{0,5} = 10,13$, sendo possível evidenciar estatisticamente a existência de dependência linear ao nível de $\alpha = 5\%$. Utilizando os parâmetros obtidos por meio da

análise da variância obtém-se os parâmetros estimados para regressão linear, como pode ser observado da tabela 17.

Tabela 17-Coeficiente de regressão para a relação entre U_{real} e U_{L2} para a espécie *Pinus elliotti* var. *elliotti*

Variável	Coeficiente	T_{dados}	$T_{0,5}$
Constante	-9,26	-1,18	3,183
U_{real}	1,43	3,83	
$N = 5$	$r^2=0,88$		

Os coeficientes apresentados na tabela 17 são significativos e permitem afirmar o quanto da variação de U_{real} pode ser explicado por U_{L2} . O valor de $t_{dados} = 3,83$ é superior ao valor crítico de $t_{0,5} = 3,183$ permitindo concluir o que ocorre com U_{real} no caso de um incremento em U_{L2} .

O gráfico dos resíduos contra os valores U_{real} apresentado na Figura 31, visa verificar a ocorrência de violações sérias nas suposições do modelo proposto, ou seja resíduo da regressão sem distribuição normal e variância variável.

FIGURA 31- Gráfico dos resíduos contra os valores de U_{real}

Do gráfico dos resíduos contra os valores U_{real} , observa-se que os resíduos apresentam uma distribuição aleatória em torno do zero, indicando que o modelo linear em estudo é satisfatório para a análise dos dados obtidos experimentalmente para *Pinnus elliotti* var. *elliotti*.

Portanto, o modelo de regressão obtido é estatisticamente significativo e permite explicar a variabilidade dos dados.

A relação obtida neste modelo é apresentada a seguir:

$$U_{\text{real}} = -9,26 + 1,43U_{L2} \quad (15)$$

6. CONCLUSÕES

Com base na experimentação realizada e nos resultados obtidos, registram-se as seguintes conclusões:

- A medição do teor de umidade de peças de madeira por meio do equipamento do tipo capacitância não permitiu a efetiva determinação do teor de umidade, e comparação com os valores obtidos por meio da estufa. Além disso, o equipamento do tipo capacitância não permitiu a obtenção expedita do teor de umidade de peças de madeira
- De maneira geral, a utilização das escalas sugeridas pelo fabricante do equipamento do tipo resistência, não conduziu a resultados verossímeis, pois para todas as espécies estudadas as escalas que apresentaram menor variabilidade de valores em relação ao método da estufa não coincidiram com a indicação do fabricante, conforme apresentado na tabela 18.

Tabela 18 - Escalas sugeridas pelo fabricante e escalas que apresentaram menor variabilidade dos valores obtidos com o medidor do tipo resistência em relação ao método da estufa.

Espécie	Escala sugerida pelo fabricante em função da densidade básica	Escalas que apresentaram menor variabilidade
<i>Goupia glabra</i>	L ₂	L ₁
<i>Pouteria pachycarpa</i>	L ₂	L ₃
<i>Eucalyptus citriodora</i>	L ₂	L ₁
<i>Hymenea ssp</i>	L ₂	L ₃
<i>Pinus elliotti</i> var. <i>elliotti</i>	L ₃	L ₂

- A escolha da escala de leitura em função da classe de resistência na qual se enquadram as espécies estudadas, sugere a utilização das escalas L₁ para as classes C30 e C40 (dicotiledôneas), e da escala L₃ para C30 e C60 (dicotiledôneas). Por outro lado, comparando-se a variabilidade da escala L₁ utilizada para a determinação dos valores de teor de umidade da *Goupia glabra*,

nota-se que esta é bem inferior à obtida para a *Pouteria pachycarpa*, sendo de 2,0% e 11,4% respectivamente. Para a classe C25 das coníferas a escala L_2 foi a que apresentou menor variabilidade. portanto, sugere-se que em função das classes de resistência sejam utilizadas as seguintes escalas do medidor elétrico:

- Classe C30 (dicotiledônea): escala L_1 ;
 - Classe C40 (dicotiledônea): escala L_1 ;
 - Classe C60 (dicotiledônea): escala L_3 ;
 - Classe C25 (conífera): escala L_2 .
-
- As expressões obtidas para relacionar os valores dos teores de umidade medidos por meio do equipamento do tipo resistência com os valores obtidos em estufa para as espécies em estudo, podem ser utilizadas, sendo que deve-se verificar a variabilidade das escalas sugeridas dentro dos níveis descritos no capítulo 5. Essas expressões estão apresentadas as seguir:
-
- *Goupia glabra*: $U_{real} = 1,81 + 0,951U_{L1}$;
 - *pouteria pachycarpa*: $U_{real} = 12,81 + 0,831U_{L3}$;
 - *Eucalyptus citriodora*: $U_{real} = 19,76 + 0,51U_{L1}$;
 - *Hymenea ssp*: $U_{real} = 12,95 + 0,79U_{L3}$;
 - *Pinus elliotti* var. *elliotti*: $U_{real} = -9,26 + 1,43U_{L2}$.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1992) **ASTM D4444/92**
Standard test methods for use and calibration of hand-held moisture meters (CD
ROM). Philadelphia

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

BURGUER, L. M. ; RICHERT, H.G. (1991). **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel

CALLISTER JR., W.D. (1994). **Materials science and engineering in introduction**.
John Wiley & Sons.

GALINA, I.C.M. (1997) **Variação da resistência elétrica em madeiras usando o**
grupamento de espécies Dissertação (mestrado) - Escola Superior de Agronomia Luís de
Queiroz, Universidade de São Paulo.

JAMES, W. L. (1984, 1988)- Eletric moisture meters for wood. **Forest Products Journal**.
Madison WI Forest products laboratory USDA.

GALVÃO, A P. M., JANKOWSKY, I. P. (1985). **Secagem racional da madeira**. São
Paulo, Nobel.

KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ, W.A. (1984) **Principles of wood science and technology**
New York, Springer Verlag.

MILOTA, M. R. (1996) Calibration of moisture meters for western hardwood species. **Forest Products Journal**, v.46, n.1, p.39 - 42.

MORAES, R.M.S.(1988) Determinação de curvas de correção para medidores elétricos de umidade para madeiras da Amazônia. **Acta Amazonica**, v.18, p.255-268, Jul./Dez.

PANSHIN, J.; DE ZEEUW, C. (1970). **Textbook of Wood Technology**. 3.ed. New York: Mcgraw -Hill.

PFAFF, F. ; GARRAHAN, P.(1984) **Moisture content correction tables for the resistance-type moisture meter**. Local, Forintek Canada.

PONCE, R.H.; WATAI, L.T.(1985). **Manual de secagem da madeira**. Brasília: STI/IPT.

RASMUSSEN, E.F.(1961). **Dry kiln Operator's Manual**. Local, Editora (Agriculture Handbook, 188).

SALES, A.(1991). **Características de resistência mecânica de algumas espécies de Eucalyptus do estado de São Paulo** Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SIAU, J.F.(1971). **Flow in Wood**. Local, Syracuse University.

SKAAR, C.(1988). **Wood - Water Relations**. New York, Springer - Verlag

TORGOVNIKOV, G.I.(1993). **Dielétric Properties of Wood - based materials**. Berlin, Springer - verlag.

TSOUMIS, G.(1991) **Science And Technology of Wood Structure, Properties, Utilization**. New York, Van Nostrand Reinhold.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

BORG, M.(1992). **Strutural Behaviour of Timber**. Canadá, North Vancouver.

CHEN, Z.; WENGERT, E.M.; LAMG, F.M.(1994). A technique to electrically measure the moisture content of wood above fiber saturation. **Forest Product Journal**, v. 44,n.9,: p.57-62

COWDREY, I.H.; BARTHOLOMEW JR, E.L.(1953). **Introductory Engineering Materials**. New York, McGraw Hill.

FLINN, R.A.; TROJAN, P.K.(1990) **Engineering Materials and Their Applications** 4.ed. Boston, Houghton Mifflin.

GIBSON, L.J.; ASHBY, M.F.(1988) **Cellular Solids**. New York, Oxford) Pergamon Press.

HAYGREEN, J.G.(1994) **Forest Products and Wood Science**: an introduction.Ames Iowa State, University Press.

POLLACK, H.W.(1970). **Materials Science and Metallurgy**. Reston: Reston.

QUARLES, S.L.(1991). Sensitivity of handheld dielétric moisture meters to a wet core. **Forest Products of Journal**, v.41 n.3, p. 33-36.

SAMSOM, M.; TREMBLEY, C.; LANGLAIS, P.A.(1993) Measuring slope of grain by electrical capacitance at moisture contents above fiber saturation. **Forest Product Journal**, v.43 n.2, p.58-60.

SIMPSON, W.T.; LOEHNERTZ, S.P.(1994) Resistance moisture meter correction for pacific yew. **Forest Products Journal**, v.44 n.1, p.63-64

SMITH, W. B. (1992) Determing moisture content in eastern redcedar. **Forest Products Journal**, v.42 n.7/8), p.67-69.