

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

RENÁ PORTO PIZETTA

DETERMINAÇÃO DA MELHOR METODOLOGIA DE UTILIZAÇÃO DE  
UM APARELHO RESISTIVO MEDIDOR DE UMIDADE

JERÔNIMO MONTEIRO  
ESPÍRITO SANTO

2011

RENÁ PORTO PIZETTA

DETERMINAÇÃO DA MELHOR METODOLOGIA DE UTILIZAÇÃO DE  
UM APARELHO RESISTIVO MEDIDOR DE UMIDADE

Monografia apresentada ao  
Departamento de Engenharia  
Florestal da Universidade Federal  
do Espírito Santo, como requisito  
parcial para obtenção do título de  
Engenheira Florestal.

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2011

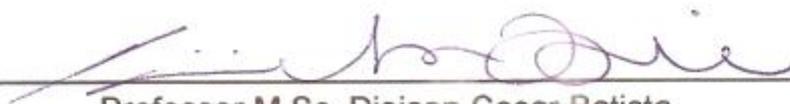
RENÁ PORTO PIZETTA

DETERMINAÇÃO DA MELHOR METODOLOGIA DE UTILIZAÇÃO DE  
UM APARELHO RESISTIVO MEDIDOR DE UMIDADE

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

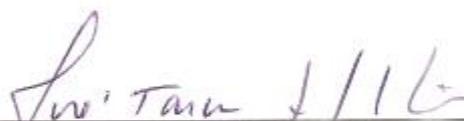
Aprovada em 17 de novembro de 2011

COMISSÃO EXAMINADORA



---

Professor M.Sc. Djeison Cesar Batista  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador



---

Professor Dr. José Tarcísio da Silva Oliveira  
Universidade Federal do Espírito Santo



---

Professora Drª. Graziela Baptista Vidaurre  
Universidade Federal do Espírito Santo

Aos meus pais, Agenor e Nilza Néri, pelo amor incondicional, dedicação e carinho nos ensinamentos da vida.

Ao meu irmão, Pedro, pela cumplicidade e atenção que temos um com o outro.

Aos meus familiares e amigos, por estarem sempre ao meu lado.

“... E você aprende que realmente pode suportar... que realmente é forte, e que pode ir muito mais longe depois de pensar que não se pode mais...”

William Shakespeare

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS, pelas oportunidades, força e coragem para seguir em frente e não desanimar.

À Universidade Federal do Espírito Santo, pela oportunidade de estar em uma instituição conceituada.

Aos professores, pelo trabalho realizado durante a graduação.

Aos meus pais que tanto se esforçaram e acreditaram em mim, tornando possível este sonho.

À minha família, e ao meu irmão, por estarem sempre ao meu lado, em todos os momentos.

Ao meu orientador, professor M.Sc. Djeison Cesar Batista, pelos ensinamentos, paciência e ajuda durante a realização do trabalho.

Ao professor Dr. Adair José Regazzi, pelo auxílio nas análises estatísticas.

Aos colegas e colaboradores Elecy Palácio Constantino, José Geraldo Oliveira e Frederico José Nistal França, pela presença e ajuda no trabalho.

Aos meus amigos de sala, por todos os momentos e alegrias compartilhados.

Às minhas amigas, Letícia Bolzan e Nayara Benedito, pelo incentivo e apoio nas horas mais difíceis, principalmente nas longas noites de estudo.

A todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para que esse trabalho pudesse ser realizado.

## RESUMO

A técnica de secagem da madeira tem por finalidade a redução do teor de umidade, cujo objetivo é chegar a um padrão de qualidade. Diversos são os métodos que podem ser empregados para determinação da umidade, sendo o resistivo o mais utilizado pela indústria devido a sua praticidade, rapidez e simplicidade. Este trabalho teve como objetivo principal analisar os aspectos operacionais do aparelho resistivo medidor de umidade DL 822 – Digisystem utilizando a madeira de teca (*Tectona grandis*), buscando-se determinar a melhor metodologia de utilização. Objetivou-se ainda analisar se existia diferença nos resultados em função da orientação da grã e profundidade de penetração dos eletrodos na madeira. Além disso, buscou-se determinar a melhor escala do aparelho para a madeira estudada e obter equações de calibração estatisticamente confiáveis, de acordo com a espécie utilizada, a partir do método gravimétrico. Para a determinação da umidade pelo método resistivo foi utilizada uma tábua dividida em 30 porções iguais e a umidade foi determinada na porção mediana de cada divisão. Para verificar a umidade pelo método gravimétrico a tábua foi refilada em serra circular e depois seccionada transversalmente. Os resultados indicaram que a orientação da grã não influenciou na medição da umidade pelo método resistivo, e sim a profundidade de penetração das agulhas. A melhor escala para determinação da umidade da madeira de teca foi a escala 2, como recomenda o fabricante. Mesmo a maioria dos tratamentos sendo significativos estatisticamente, nem todos os modelos das equações geradas pela regressão inversa foram indicados para a calibração do aparelho. São necessários mais estudos que possam utilizar agulhas correspondentes a 1/3 da espessura das peças, com o objetivo de se obter melhores modelos de calibração, bem como análises do teor de extrativos da madeira, visando à utilização desse fator em modelos de regressão múltipla para a calibração do aparelho elétrico resistivo medidor de umidade.

**Palavras - chave:** Madeira. Medidor elétrico resistivo de umidade. Regressão inversa. *Tectona grandis*.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 O problema e sua importância.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo geral.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Secagem da madeira.....	4
2.2 Umidade da madeira.....	5
2.2.1 Tipos de água na madeira.....	6
2.3 Métodos para determinação da umidade da madeira.....	6
2.3.1 Método de secagem em estufa ou gravimétrico.....	7
2.3.2 Medidores elétricos.....	8
2.3.3 Outros métodos de determinação da umidade.....	9
2.4 Caracterização da espécie <i>Tectona grandis</i> .....	10
2.4.1 Extrativos da madeira.....	11
2.5 Predição inversa (calibração).....	13
3 METODOLOGIA.....	16
3.1 Determinação da umidade pelo método do medidor elétrico.....	17
3.2 Determinação da umidade pelo método gravimétrico.....	19
3.3 Análises estatísticas.....	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
4.1 Análise de variância.....	23
4.2 Análise de regressão inversa.....	25
4.3 Perfil de umidade em relação ao comprimento da tábua.....	28
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	31
6 REFERÊNCIAS.....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tratamentos.....	16
Tabela 2 – Média, amplitude e coeficiente de variação da umidade da madeira de teca por tratame.....	23
Tabela 3 – Equações obtidas pela análise de regressão inversa a partir do método gravimétrico e do medidor elétrico de umidade.....	26

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Logaritmo da corrente contínua de resistividade (ohm/cm) em relação ao conteúdo de umidade da madeira M(%) acima e abaixo do ponto de saturação das fibras (Mf).....	8
Figura 2 – Gráfico de predição inversa.....	14
Figura 3 – Ilustração da amostragem dos corpos de prova a partir da tábua utilizada.....	17
Figura 4 – Determinação da umidade da tábua de teca com a utilização do aparelho medidor elétrico DL 822 – Digisystem.....	18
Figura 5 – Utilização do aparelho em relação à orientação da grã da madeira: (a) paralelo e (b) perpendicular.....	19
Figura 6 – Utilização do aparelho quanto à profundidade de penetração na madeira: (a) $\frac{1}{4}$ da espessura e (b) $\frac{1}{2}$ da espessura, com agulhas de 1 cm e 2 cm respectivamente.....	19
Figura 7 – Umidade ao longo da tábua de teca de acordo com o método gravimétrico.....	29
Figura 8 – Perfil de umidade da tábua de teca pelo método resistivo.....	30

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de secagem é o que mais agrega valor aos produtos sólidos da madeira, cuja finalidade é reduzir a umidade, apresentando uma boa qualidade, com mínimo de defeitos em um menor tempo de operação. Por isso, a determinação imediata da umidade é útil e necessária, principalmente no que diz respeito ao controle de qualidade. Assim, os aparelhos elétricos medidores de umidade do tipo resistivo são amplamente utilizados pela indústria.

Nos anos 30 do século passado Stamm descobriu que existia relação entre a umidade da madeira e a resistência da passagem de corrente elétrica, permitindo o desenvolvimento dos medidores elétricos do tipo resistivo. Esses medidores são dotados de escalas, cujo objetivo é corrigir o teor de umidade e encontrar a melhor delas em função de um grupamento de espécies (CALONEGO *et al.*, 2006).

Tais medidores apresentam como vantagens a praticidade, rapidez na determinação da umidade e o fato de ser um método não destrutivo. No entanto, são limitados ao uso no limite da água higroscópica e tem menor precisão do que o método gravimétrico.

Um medidor do tipo resistivo é projetado para medir a resistência elétrica entre dois pontos em uma peça de madeira. A resistência é usualmente medida entre dois eletrodos ou agulhas, os quais são fincados na madeira de maneira a permanecerem alinhados ao longo da grã. As agulhas podem ser de dois tipos principais: com isolamento e sem isolamento. Eletrodos isolados podem ser de qualquer comprimento e sua característica de identificação é que eles são revestidos com um verniz não condutor ao longo de seu comprimento, exceto na ponta ou últimos 3 mm. O resultado disso é que a resistência, e conseqüentemente o teor de umidade, é medida apenas entre as pontas dos eletrodos. Conforme os pares de agulhas são fincados na madeira para diversas distâncias, o teor de umidade a várias profundidades pode ser determinado (MACKAY; OLIVEIRA, 1989 citados por BATISTA; KLITZKE; SAVIOLI, 2008).

A espécie Teca (*Tectona grandis* L.f), pertence à família Verbenaceae, é uma espécie exótica, originária da Índia e Indonésia (LORENZI *et al.*, 2003). Segundo Lamprecht (1990), a área de ocorrência natural dessa espécie situa-se entre as

altitudes 10° e 25° N no subcontinente Índico e no sudeste asiático, especialmente na Índia, Burma, Tailândia, Laos, Camboja, Vietnã e Java. Produz uma das madeiras mais belas e melhores que existem, com excelente qualidade em todos os aspectos, podendo ser utilizada para as mais diversas finalidades. É considerada como insuperável na construção naval, sendo adequada para todo o tipo de construções dentro e fora de água, bem como para interiores luxuosos e mobiliário de alto preço.

### **1.1 O problema e sua importância**

A secagem da madeira é fundamental no processo produtivo, sendo responsável por grande parte do valor agregado ao produto final, mas também uma das ações que mais contribui nos custos no processo de transformação. Por esta razão a busca de maior eficiência no processo de secagem deve ser constantemente procurada.

A determinação imediata do teor de umidade é útil e necessária em diversos processos produtivos que envolvem a madeira, principalmente no controle de qualidade da madeira proveniente da secagem convencional.

Os aparelhos elétricos que operam pelo método resistivo são amplamente utilizados pela indústria madeireira no controle da umidade final de cargas de madeira. Porém, esses aparelhos não são precisos, e não raras vezes ocorrem impasses entre produtor e consumidor com respeito ao teor de umidade final da madeira, por causa da utilização de aparelhos diferentes ou mesmo de um mesmo aparelho.

As diferenças de resultados entre aparelhos ocorrem por causa do princípio de funcionamento, que pode ser diferente (capacitivo ou resistivo) e, mesmo pelo tipo de construção do aparelho, de acordo com cada fabricante. Mesmo utilizando-se um mesmo aparelho, diferentes resultados podem ser obtidos para um mesmo lote ou peça de madeira, por causa das diferentes condições operacionais, a saber: escalas, tamanho de agulhas e orientação em relação às fibras.

Por isso, torna-se importante conhecer as melhores condições de utilização do aparelho medidor elétrico disponível, buscando-se obter resultados confiáveis, os mais próximos possíveis daqueles obtidos pelo método gravimétrico, que é considerado o método mais preciso.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Analisar os aspectos operacionais do aparelho resistivo medidor de umidade DL 822 – Digisystem utilizando a madeira de teca (*Tectona grandis*), buscando-se determinar a melhor metodologia de utilização.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Analisar como a orientação da grã em relação aos eletrodos do aparelho interfere na determinação da umidade;
- Analisar como a profundidade de penetração dos eletrodos interfere na determinação da umidade;
- Determinar a melhor escala do aparelho para a madeira estudada;
- Obter equações de calibração estatisticamente confiáveis para o aparelho, de acordo com a espécie utilizada, a partir do método gravimétrico;
- Analisar o perfil de umidade na espessura e no comprimento da tábua.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Secagem da madeira

O conhecimento sobre os princípios físicos envolvidos na secagem de madeiras permite propor soluções ou encontrar formas de aprimorar o processo. Porém, não se pode esquecer que a madeira é um material proveniente de um ser vivo, sujeito as leis genéticas e as influências do meio em que vegeta (JANKOWSKY, 2010).

Segundo Jankowsky (1990), a madeira proveniente de árvores recém-abatidas apresenta alto teor de umidade, que tende a reduzir-se espontânea e lentamente à medida que as toras aguardam o desdobramento inicial. Após o desdobro, a umidade continua a diminuir com maior ou menor rapidez em função da espécie vegetal, das condições ambientais, das dimensões das peças e do empilhamento utilizado. Entretanto, o processamento final só deve ser efetuado quando a umidade atingir níveis inferiores ao ponto de saturação das fibras (PSF), que é de 30%.

A técnica de secagem da madeira tem por finalidade a redução do seu teor de umidade a fim de levá-la até um determinado ponto definido, com um mínimo de defeitos, no menor tempo possível e de uma forma economicamente viável, tendo-se em mente a finalidade do produto (SEVERO, 2007).

O processo de secagem ao ar livre é um método prático e que pode reduzir em 400 kg ou mais o peso da carga de madeira para cada m<sup>3</sup> transportado. Desta forma, os custos com frete e mão de obra podem ser sensivelmente reduzidos (REMADE, 2004a).

De acordo com Galvão e Jankowsky (1985), deve-se salientar que a perda de água primeiramente reduz o peso da madeira, diminuindo o custo do seu transporte, mas, independente deste fator econômico, a transformação racional da madeira bruta em produtos e bens de consumo requer a sua secagem prévia pelas seguintes razões:

- Redução da movimentação dimensional a limites aceitáveis. Como consequência, as peças de madeira podem ser produzidas com maior precisão de dimensões, proporcionando melhor desempenho em serviço;
- Melhoria na atuação dos vernizes e tintas aplicadas sobre a madeira;
- Redução dos riscos de ataque de fungos apodrecedores e manchadores;
- Proporciona melhor qualidade das juntas de colagem;
- Propicia maior impregnação da madeira com líquidos preservativos e ignífugos;
- Aumenta a resistência mecânica da madeira.

Outra razão que leva a adoção da prática da secagem da madeira é a redução na movimentação dimensional, ou seja, a madeira tende a contrair-se conforme vai secando e expandir-se conforme absorve umidade. Uma secagem adequada até um determinado teor de umidade final diminuirá a movimentação dimensional da peça evitando empenamentos e rachaduras (REMADE, 2004a).

O equilíbrio da umidade melhora as propriedades de isolamento, pois a madeira seca conduz menos calor que a úmida, além de aumentar sensivelmente suas propriedades de isolamento elétrico e acústico. Outros benefícios que podem ser obtidos ao se efetuar a secagem artificial em relação à secagem natural são: redução do tempo de secagem, favorecendo um giro mais rápido do capital investido; redução da área destinada ao armazenamento da madeira; obtenção de teores de umidade mais baixos; redução dos defeitos de secagem como rachaduras e empenamentos; combate e eliminação de organismos xilófagos presentes na madeira (REMADE, 2004a).

## **2.2 Umidade da madeira**

O conteúdo de umidade da madeira dentro das árvores vivas pode variar entre 35 a 200%, dependendo da espécie, variando sua proporção em relação com a massa específica da espécie e as condições climáticas da região onde se desenvolve. A retirada desta água irá ocorrer logo após a derrubada e

processamento da árvore através da secagem, a qual pode ser natural (ar livre) ou artificial (em câmara) (KLITZKE, 2007).

A secagem da madeira está diretamente relacionada com a sua estrutura celular. Nas folhosas o lenho é composto de vários tipos de células: fibras, vasos, células parenquimáticas e raios. As coníferas são compostas basicamente por traqueídeos e raios. Em comparação com as folhosas, as coníferas apresentam geralmente uma estrutura celular mais simples (REMADE, 2004a).

### **2.2.1 Tipos de água na madeira**

Existem dois tipos de água na madeira: água de capilaridade (água livre), que se encontra ocupando as cavidades e lumes dos elementos celulares, resultando numa condição saturada para a madeira (KLITZKE, 2007). Teoricamente este tipo de água pode ser facilmente retirado. A água passa de uma célula para outra até atingir a superfície externa da madeira (REMADE, 2004a).

O outro tipo é a água de adesão ou higroscópica (água presa), localizada no interior das paredes celulares. Este tipo de água mantém-se unida às paredes das células em estado de vapor. A retirada deste tipo de água é mais difícil e o processo geralmente é mais lento, sendo necessária a utilização de mais energia (REMADE, 2004a).

Quando toda a água livre ou de capilaridade é retirada da madeira permanecendo apenas a água de adesão, diz-se que a madeira atingiu o ponto de saturação das fibras (PSF). O PSF é importante, pois é a partir deste ponto que ocorrem alterações significativas em praticamente todas as propriedades da madeira, dentre elas as elétricas (REMADE, 2004a).

## **2.3 Métodos para determinação da umidade da madeira**

Existem vários métodos para verificar o teor de umidade das madeiras, alguns são precisos, porém, não são imediatos, enquanto outros permitem a obtenção de uma rápida resposta, mas apresentam precisão contestada pela literatura.

A escolha de um método adequado leva em consideração a viabilidade econômica e, é claro a finalidade do produto, sendo importante comparar as técnicas atuais de determinação do teor de umidade para a escolha do melhor método para cada situação.

### 2.3.1 Método de secagem em estufa ou gravimétrico

O método da secagem em estufa (ou gravimétrico) é um dos mais precisos para determinação da umidade da madeira, envolvendo a pesagem das amostras, porém é também aquele que requer um maior período de tempo. Utiliza-se uma estufa dotada de circulação forçada de ar e termostato para controle da temperatura entre 101 e 105°C, além de uma balança com precisão de, pelo menos, 0,1g (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

A umidade da madeira é a relação entre a massa de água presente em uma peça de madeira pela massa seca (anidra). A Equação 1 expressa a forma de determinação da umidade pelo método da estufa.

$$U = \frac{(M_u - M_s)}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

U: umidade (%);

M<sub>U</sub>: massa úmida inicial (g);

M<sub>S</sub>: massa anidra (g).

Apesar de ser o método mais simples e preciso de determinação da umidade, o método gravimétrico apresenta como desvantagens os fatos de ser destrutivo, exigir muito tempo para obter-se a resposta e ser inviável para espécies com componentes voláteis. Contudo, apresenta como grande vantagem possibilitar a obtenção de resultados, com precisão satisfatória, para qualquer umidade em que a madeira se encontrar (CALONEGO *et al.*, 2006).

### 2.3.2 Medidores elétricos

Dentre os medidores elétricos, os mais populares são os de resistência elétrica. São aparelhos de grande utilidade na indústria, pois determinam a umidade da madeira imediatamente. O princípio de funcionamento baseia-se na resistência a passagem de corrente elétrica, que varia inversamente com a umidade da madeira. São aparelhos práticos, rápidos e não destrutivos. Possuem agulhas que são introduzidas na madeira, fornecendo a leitura analógica ou digital, dependendo do aparelho utilizado, através de um mostrador. São mais precisos dentro de uma faixa de umidade que varia de 7% até 30% (JANKOWSKY, 2010).

De acordo com Skaar (1972), a confiabilidade de medidores de umidade resistivos é geralmente boa na faixa de umidade higroscópica. No entanto, acima do PSF a confiabilidade é ruim por causa de alguns fatores. Primeiramente, a variação da resistividade com a umidade é relativamente pequena (Figura 1) acima do PSF, e a sensibilidade dos medidores é muito reduzida.

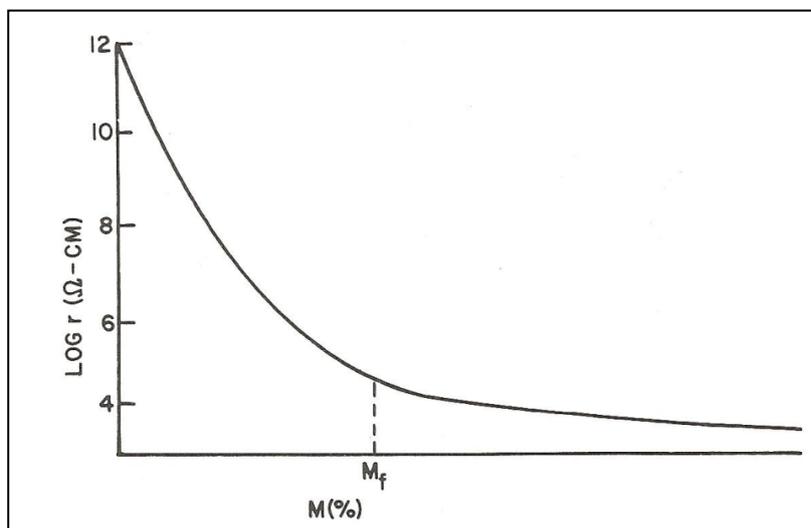


Figura 1 – Logaritmo da corrente contínua de resistividade (ohm/cm) em relação ao conteúdo de umidade da madeira M(%) acima e abaixo do ponto de saturação das fibras (M<sub>f</sub>)

Fonte: Adaptado de Skaar (1972).

Em segundo lugar, existem variações no conteúdo de eletrólitos na água das cavidades celulares entre os tipos de madeira, e até mesmo de um ponto para o outro na mesma amostra de madeira, ocasionando em grandes variações de resistividade. Em terceiro, dependendo do tempo, os efeitos tornam-se mais pronunciados em teores de umidade mais altos. Em outras palavras, o valor de resistividade aparente da corrente contínua muda substancialmente com o tempo após a aplicação da tensão.

Portanto, medidores de umidade resistivos são mais úteis na faixa de umidade da água higroscópica, que está entre 6 ou 7% e 25-30% de umidade, em temperatura ambiente. Quando a madeira está abaixo deste limite, a resistividade é muito alta para medir com medidores de umidade comuns e; quando a madeira encontra-se acima deste limite, a confiabilidade é ruim, conforme a Figura 1. (SKAAR, 1972).

Sobre o método de utilização dos medidores resistivos de umidade, recomenda-se que as agulhas devam ser cravadas paralelamente à direção das fibras, porque dependendo da espécie de madeira a resistividade pode ser duas ou três vezes maior na direção normal às fibras. Ainda, as agulhas devem ser penetradas na madeira aproximadamente 1/3 da espessura da peça (KLITZKE, 2007).

### **2.3.3 Outros métodos de determinação da umidade**

Existem outros métodos de determinação da umidade da madeira além dos métodos gravimétrico e dos medidores elétricos. Um dos mais importantes é o método da destilação, indicado para madeiras que contenham teor significativo de extrativos voláteis. O teor de água é determinado volumetricamente, utilizando-se produtos químicos específicos como xileno ou tolueno como extratores, por não se misturarem com a água contida na madeira (GALVÃO; JANKOWSKY 1985).

Outro método, porém um pouco menos utilizado, é o da Titulação Karl Fischer, que se baseia na determinação iodométrica da água que é removida da madeira por destilação. Ainda existe o método higrométrico, que determina a umidade da madeira introduzindo-se um higrômetro em um orifício previamente aberto na madeira. Este orifício é selado, e após a umidade da madeira entrar em

equilíbrio com o ar contido no seu interior, o teor de umidade da madeira é obtido (JANKOWSKY, 2010).

Existe ainda o método da radiação nuclear, que utiliza um gerador de nêutrons de alta velocidade, os quais são dirigidos para a madeira. Parte destes nêutrons tem sua velocidade diminuída pelas moléculas de hidrogênio presentes nas moléculas de água, e a sua contagem é efetuada através de um detector. Como o teor de umidade é avaliado em função do peso da madeira, a sua densidade deve ser medida, sendo efetuada através de radiação gama. Para isso, um feixe de raios gama é dirigido para a madeira e a intensidade de radiação refletida através do material, que é inversamente proporcional a sua densidade, é medida por um detector. Os dados dos dois detectores combinados fornecem o teor de umidade da madeira (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

#### **2.4 Caracterização da espécie *Tectona grandis***

A espécie teca (*Tectona grandis* L.f.), conhecida internacionalmente como *teak*, pertencente à família Verbenaceae, é uma espécie de ocorrência natural do Centro e Sul da Índia, Mianmar, Norte da Tailândia e Laos, que atinge cerca de 35 m de altura e 100 cm de diâmetro a altura do peito (DAP). No Brasil, esta espécie foi introduzida no final da década de 1960, implantada pela empresa Cáceres Florestal S.A., em Cáceres - MT, onde as características climáticas são semelhantes àsquelas dos países de origem, agregando solos de melhor qualidade, o que reduziu o ciclo natural de 80 para 25 anos (TSUKAMOTO FILHO *et al.*, 2003).

Segundo Macedo *et al.* (2002), é uma espécie arbórea de grande porte, que produz madeira de boa qualidade, com tronco retilíneo, pouco sujeito a pragas e doenças e resistente ao fogo. É estimada pela resistência, durabilidade e diferenciada beleza, tendo grande procura ao redor do mundo.

A madeira de teca possui fibras retas, textura mediana e oleosa ao tato, e fragrância suave depois de seca. A secagem ao ar livre (com pouca exposição ao sol) é rápida e satisfatória. Apresenta alburno amarelado ou esbranquiçado, geralmente delgado, contrastando com o cerne que é castanho-amarelo-dourado.

Podem ser observados anéis de crescimento nítidos e diferenciados nos cortes transversais (FIGUEIREDO; OLIVEIRA; BARBOSA, 2005).

A madeira possui o alburno numa coloração mais clara e o cerne um marrom vivo e brilhante e, por isso, muito utilizada para decoração. Além de decorativa, a madeira pode ser utilizada para laminação, compensados, lenha e carvão. É uma madeira leve, de densidade média ( $0,65 \text{ g.cm}^{-3}$ ), porém apresenta boa resistência a tração e flexão. É bastante estável e praticamente não empena, apresentando também boa durabilidade do cerne, causado pela presença de tectoquinona, um preservativo natural contido em suas células (ANGELI, 2003).

Além do efeito decorativo, a madeira de teca é utilizada para as mais diversas finalidades: construção naval, laminação e compensados, lenha e carvão vegetal; as duas últimas são específicas para as áreas de ocorrência natural (REMADE, 2004b). A madeira é muito valiosa pela qualidade e durabilidade, de grande importância na construção naval, o que tem despertado o seu cultivo nas regiões tropicais do Brasil (LORENZI *et al.*, 2003).

A teca deve a sua importância e o seu valor tanto às propriedades físicas e mecânicas desejáveis da madeira quanto à sua robustez e desenvolvimento vigoroso. As principais características de sua madeira são: durabilidade, estabilidade, facilidade de pré-tratamento e resistência natural ao ataque de fungos e insetos. Devido às suas características e propriedades únicas e superiores, a teca é uma das madeiras de folhosa mais valorizada no mundo (FIGUEIREDO, 2001).

Seu valor comercial pode superar o de espécies tradicionais como o mogno (*Swietenia macrophylla*), que chega a custar US\$ 1500/m<sup>3</sup> no mercado internacional (FIGUEIREDO; OLIVEIRA; SCOLFORO, 2005).

#### **2.4.1 Extrativos da madeira**

Na madeira de teca, o cerne apresenta maior teor de extrativos do que o alburno. Os extrativos da madeira são os constituintes que podem ser extraídos com o uso da água, de solventes orgânicos (neutros) ou volatilizados a vapor. Além da madeira, os extrativos ocorrem também na casca, folhas, flores e sementes e quase sempre as quantidades nessas partes da árvore são proporcionalmente maiores do que na madeira. Fazem parte deste grupo os ácidos resinosos e graxos, além de

seus ésteres, ceras, substâncias insaponificáveis, pigmentos, etc. Estes compostos são frequentemente responsáveis por certas características da madeira, tais como: cor, aroma, resistência ao apodrecimento, propriedades organolépticas e abrasivas (SANTOS *et al.*, 2010).

A presença de extrativos na madeira provoca a redução da permeabilidade, tornando lenta a secagem e dificultando a impregnação com preservantes químicos. Além disso, provoca aumento da estabilidade dimensional em condições de umidade variável; aumento ligeiro do peso; toxidez nos organismos xilófagos aumentando a durabilidade da madeira; consumo de mais produtos químicos no branqueamento da polpa de celulose; corrosão de metais (taninos); interferência na aplicação de tintas, vernizes e colas; e coloração agradável (SANTOS *et al.*, 2010).

Os extrativos são responsáveis por transmitir várias características em maior escala à madeira. Por exemplo, extrativos proporcionam a durabilidade natural de madeiras que têm resistência a fungos apodrecedores. No caso de uma madeira como teca, conhecida por sua estabilidade e resistência à água, estas propriedades são atribuídas em grande parte pelas ceras e óleos formados e depositados no cerne (WIEDENHOEFT, 2010).

Tanto para folhosas quanto para coníferas, o alburno seca mais rápido do que o cerne, apesar de possuir um teor de umidade mais elevado. Isto se deve a sua alta permeabilidade em relação ao cerne, tendo em vista também, que o cerne apresenta maior quantidade de extrativos que podem obstruir as aberturas das paredes celulares (KLITZKE, 2007).

A presença de resinas e outros extrativos dificultam a movimentação de água e com isso aumentam o tempo de secagem da madeira, uma vez que os extrativos ficam alocados nas pontes de hidrogênio, ocupando sítios que estariam normalmente ocupados por moléculas de água.

De um modo geral, a presença de extrativos reduz a higroscopicidade da madeira. No entanto, Galvão e Jankowsky (1979) também comprovaram os pressupostos de outros autores, de que o teor de extrativos nem sempre é fator determinante na redução da higroscopicidade da madeira, e sua influência varia com a espécie. Por exemplo, em condições de umidade relativa inferiores a 60%, um

conteúdo elevado de extrativos não implica necessariamente em redução da umidade de equilíbrio (GALVÃO; JANKOWSKY, 1979).

## 2.5 Predição inversa (calibração)

Segundo Miller (1993) citado por Costa, Oliveira e Luna (2006), utiliza-se a análise de regressão para avaliar a calibração instrumental e suas incertezas associadas. O modelo de regressão assume que a variável aleatória  $X$  é conhecida e a variável dependente  $Y$  é desconhecida. Utilizando-se o método dos quadrados mínimos, calculam-se as estimativas do coeficiente angular ( $\beta_1$ ) e do intercepto da curva de regressão resultante ( $\beta_0$ ). Este modelo é utilizado para prever os valores de  $Y$  a partir dos valores de  $X$ , conforme o modelo linear de 1º grau mostrado na Equação 2.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_i + \varepsilon_i \quad (2)$$

Em que:

$Y_i$ : valor observado da variável dependente  $Y$  no nível  $i$  da variável independente  $X_i$ ;

$X_i$ : valor do nível  $i$  de  $X$  ( $i=1, 2, \dots, n$ );

$\beta_0$ : ordenada à origem (intercepto da reta com o eixo  $Y$ );

$\beta_1$ : coeficiente angular (declividade da reta);

$\varepsilon_i$ : erro ou desvio associado à distância entre o valor observado  $Y_i$  e o valor estimado  $\hat{Y}_i$ .

O modelo de regressão estimada (Equação 3) é dado por:

$$\hat{Y}_i = b_0 + b_1 \cdot X_i \quad (3)$$

De acordo com Ogliari (2011), em muitos estudos uma regressão de  $Y$  sobre  $X$  é usada para estimar o valor de  $X$  o qual originou um novo valor de  $Y$ . Nestes casos, também se utiliza o modelo de regressão estimada mostrado na Equação 2,

porém com algumas considerações. Nesses casos, teremos uma nova observação ( $Y_{h(novo)}$ ) e desejamos estimar o nível  $X_{h(novo)}$  que origina esta nova observação. A partir da Equação 2, obtém-se a Equação 4.

$$\hat{X}_{h(novo)} = \frac{Y_{h(novo)} - b_0}{b_1} \quad b_1 \neq 0 \quad (4)$$

Na Figura 2 encontra-se um exemplo gráfico de predição inversa comumente utilizada em casos de calibração.

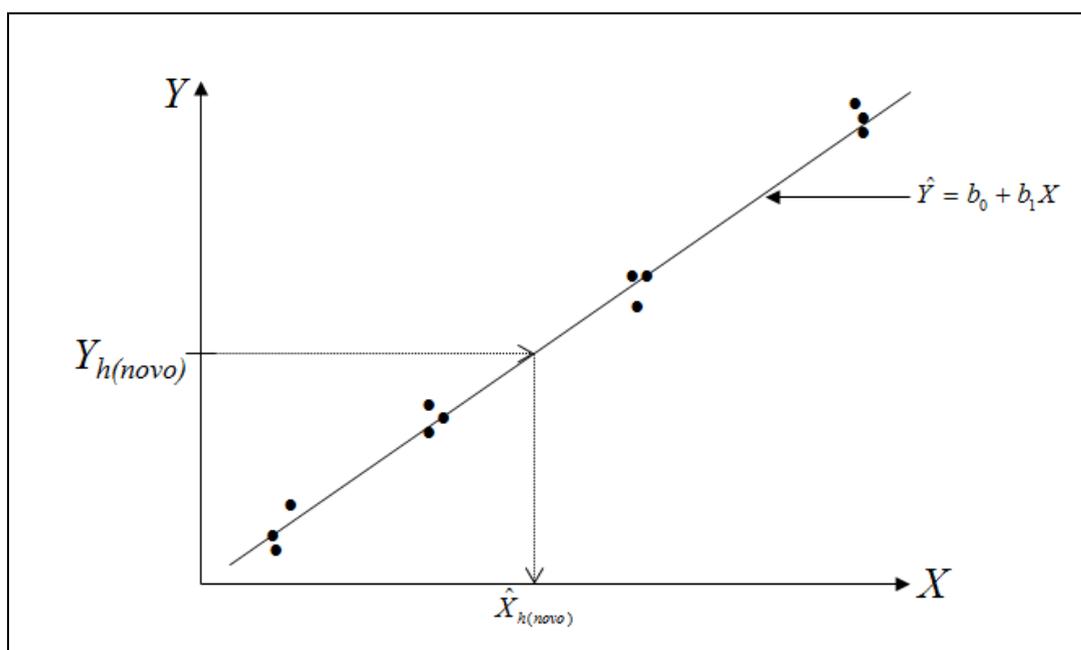


Figura 2 – Gráfico de predição inversa

Fonte: Ogliari (2011).

Em problemas de calibração, geralmente tem-se medidas (Y), rápidas, mais baratas e aproximadas, relacionadas com medidas (X), precisas, caras e demoradas sobre n observações. O modelo de regressão resultante é, então, utilizado para estimar uma medida precisa “nova” ( $X_{h(novo)}$ ), a partir de uma medida aproximada “nova” ( $Y_{h(novo)}$ ) (OGLIARI, 2011).

A determinação da umidade adéqua-se perfeitamente a um problema de calibração, em que se tem a medida gerada pelo medidor elétrico de umidade

(rápida, pouco precisa e não destrutiva), relacionada com a medida do método gravimétrico (demorada, precisa e destrutiva).

De acordo com Ribeiro Júnior (2005), o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) fornece uma informação adicional para verificar se o modelo proposto é adequado ou não para estudar a variável Y, ou seja, funciona como ferramenta de tomada de decisão sobre os modelos gerados. O  $R^2$  mede quanto da variação de Y é explicada pela regressão ou quanto desta variação é explicado pela variável X por meio da equação de regressão.

Quanto mais próximo da unidade (ou 100%) estiver o valor de  $R^2$ , melhor será a qualidade de ajuste do modelo de regressão aos pontos do diagrama de dispersão, ou seja, menor será a influência atribuída às causas aleatórias medidas pelo resíduo. Desta forma, o  $R^2$  pode ser definido como o grau de ajuste da reta estimada ao conjunto de dados (RIBEIRO JÚNIOR, 2005).

### 3 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido a partir das premissas do funcionamento do aparelho, recomendadas pelo fabricante. De acordo com o manual do fabricante (DIGISYSTEM, 2006), o aparelho medidor elétrico resistivo de umidade DL 822 deve ser utilizado paralelo às fibras e com agulhas de comprimento correspondente à 1/3 da espessura das peças.

Os tratamentos estão representados na Tabela 1.

Tabela 1 – Tratamentos

<b>Tratamentos</b>	<b>Orientação em relação à grã</b>	<b>Profundidade</b>
1 - Gravimétrico	-	-
2	Paralela / Escala 1	
3	Paralela / Escala 2	
4	Paralela / Escala 3	¼ da espessura
5	Perpendicular / Escala 1	
6	Perpendicular / Escala 2	
7	Perpendicular / Escala 3	
8	Paralela / Escala 1	
9	Paralela / Escala 2	
10	Paralela / Escala 3	½ da espessura
11	Perpendicular / Escala 1	
12	Perpendicular / Escala 2	
13	Perpendicular / Escala 3	

Fonte: A autora (2011).

Os tratamentos foram idealizados a partir da elaboração das seguintes hipóteses:

- a) A orientação das fibras exerce influência significativa na umidade obtida pelo aparelho?
- b) A profundidade de medição recomendada pelo fabricante é a ideal para a determinação da umidade, ou podem-se utilizar outras?
- c) Existe diferença significativa de umidade entre as três escalas do aparelho?

Para a realização do trabalho foi utilizada uma tábua de teca (*Tectona grandis* L.f.), de dimensões nominais iguais a 40 x 170 x 2200 mm, conforme ilustrado na Figura 3. A umidade média da tábua foi igual a 11,37% correspondendo ao equilíbrio com o ambiente de armazenamento, dentro da faixa de operação recomendada pelo fabricante (8 a 60% de umidade).

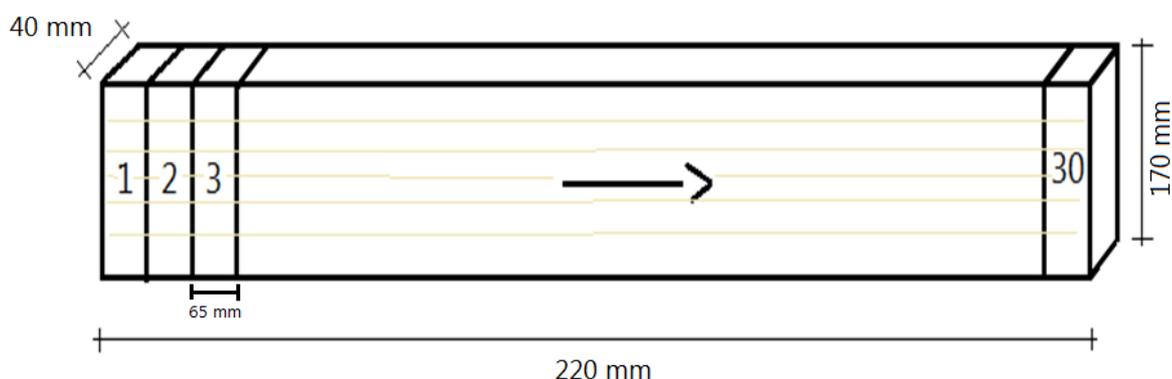


Figura 3 – Ilustração da amostragem dos corpos de prova a partir da tábua utilizada  
Fonte: A autora (2011).

### 3.1 Determinação da umidade pelo método do medidor elétrico

Para determinação da umidade pelo método resistivo foi utilizado o medidor elétrico de umidade modelo DL 822 – Digisystem, que possui três escalas de medição. De acordo com as especificações do fabricante (DIGISYSTEM, 2006), a escala 1 é recomendada para a determinação da umidade de madeiras de

densidade maior do que  $0,75 \text{ g/cm}^3$ , a escala 2 para densidade entre  $0,50$  e  $0,75 \text{ g/cm}^3$ ; enquanto a escala 3 para densidade inferior a  $0,50 \text{ g/cm}^3$ .

De acordo com o proposto pelo fabricante, a escala 2 é mais adequada para a determinação da umidade da madeira de teca, uma vez que essa madeira possui densidade aparente (15%) média de  $0,62 \text{ g/cm}^3$  (MOTTA, 2011). O fabricante ainda recomenda a utilização do aparelho orientado na direção paralela às fibras e com agulhas de comprimento correspondente a  $1/3$  da espessura das peças a serem medidas.

Inicialmente, a tábua foi demarcada com giz de cera em 30 porções iguais de aproximadamente 65 mm de comprimento. Em cada uma destas divisões, na porção mediana, determinou-se a umidade com o medidor elétrico.

Na Figura 4 pode ser observada a tábua e o aparelho utilizados durante a determinação da umidade.

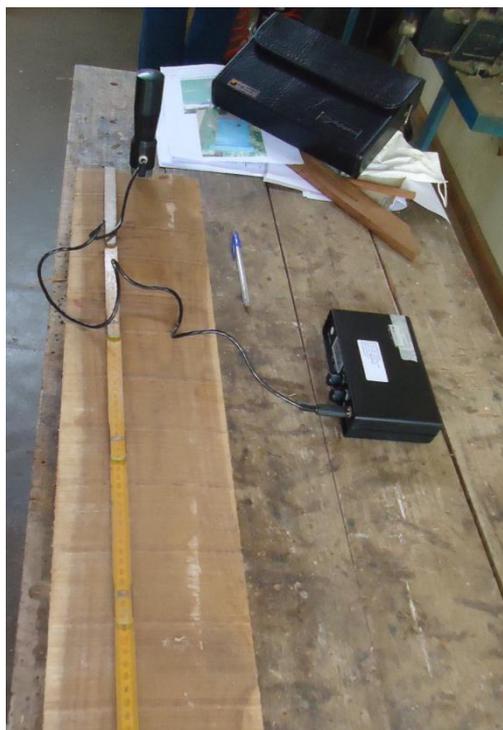


Figura 4 – Determinação da umidade da tábua de teca com a utilização do aparelho medidor elétrico DL 822 – Digisystem

Fonte: A autora (2011).

Inicialmente, a umidade foi medida na direção paralela às fibras, na escala 1 do aparelho, utilizando-se agulhas de 1 cm de comprimento, correspondendo a  $\frac{1}{4}$  da espessura da tábua, trocando-se em seguida para as escalas 2 e 3. Em seguida, com as mesmas agulhas, efetuou-se a determinação da umidade na direção perpendicular à grã, repetindo-se todo o procedimento. De forma idêntica, determinou-se a umidade com as agulhas de 2 cm, correspondendo a  $\frac{1}{2}$  da espessura da tábua, como representado nas Figuras 5 e 6.

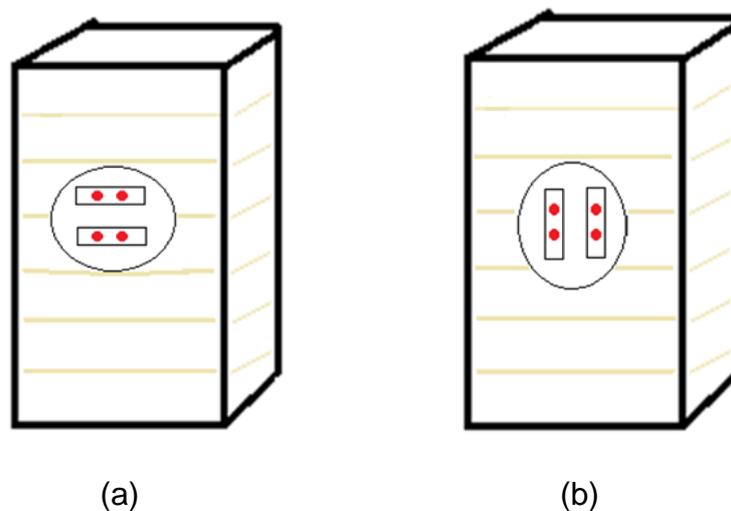


Figura 5 – Utilização do aparelho em relação à orientação da grã da madeira: (a) paralelo e (b) perpendicular

Fonte: A autora (2011).

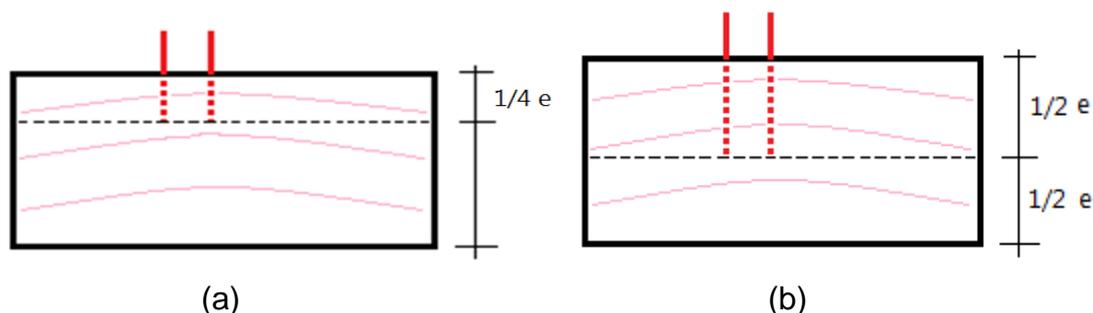


Figura 6 – Utilização do aparelho quanto à profundidade de penetração na madeira: (a)  $\frac{1}{4}$  da espessura e (b)  $\frac{1}{2}$  da espessura, com agulhas de 1 cm e 2 cm respectivamente

Fonte: A autora (2011).

Para a determinação da umidade pelo método resistivo, não foram realizadas medições à 1/3 de espessura da madeira, conforme recomendado pelo fabricante. Isso ocorreu por dois motivos: i) o modelo de aparelho utilizado somente dispõe de dois tipos de agulha (1cm e 2 cm); ii) a espessura da tábua disponível para a realização do estudo era de 40 mm. Portanto, com as agulhas disponíveis não se obteve a profundidade de 1/3.

Desta forma, prezando-se pela correta penetração das agulhas e confiabilidade dos resultados, as agulhas foram cravadas por inteiro nas amostras, correspondendo à  $\frac{1}{4}$  e  $\frac{1}{2}$  da profundidade da espessura da tábua.

A espessura da tábua poderia ser reduzida para 30 mm, resultando em penetração à 1/3 de espessura com a agulha de 1 cm. Porém, optou-se por não se utilizar deste expediente, uma vez que tal ação alteraria os gradientes de umidade da tábua, prejudicando a confiabilidade dos dados obtidos.

### **3.2 Determinação da umidade pelo método gravimétrico**

Em seguida, a umidade das amostras foi determinada pelo método gravimétrico. Desta forma, a tábua foi refilada em serra circular e depois seccionada transversalmente, gerando 30 corpos de prova de dimensões nominais iguais a 40 x 60 x 65 mm. Os corpos de prova foram imediatamente pesados em balança digital (precisão 0,01g), para obtenção da massa inicial e, em seguida, foram levados à estufa com temperatura de  $103 \pm 2$  °C, onde permaneceram por 48 horas, até atingirem massa constante. Após esse período, os corpos de prova foram colocados em dessecador (com sílica gel) por aproximadamente 50 minutos, para resfriamento, e foram pesados novamente em seguida, determinando-se a massa anidra.

Para determinação da umidade pelo método gravimétrico foi utilizada a Equação 1 (página 7).

Para fins de análise e comparação, os resultados de umidade obtidos pelo método gravimétrico foram considerados como os mais corretos, conforme Galvão e Jankowsky (1985). Desta forma, foram comparados os valores de umidade obtidos

nos tratamentos 2 a 13, obtidos pelo aparelho medidor elétrico, com aqueles gerados pelo método gravimétrico (tratamento 1).

### 3.3 Análises estatísticas

Os resultados de umidade dos tratamentos foram analisados a partir da Análise de Variância (ANOVA). Havendo diferença significativa entre pelo menos duas médias, correspondente a um valor de probabilidade menor ou igual a 5% ( $p\text{-value} \leq 0,05$ ), procedeu-se o teste de Tukey (5% de significância) para diferenciação das médias.

A análise de regressão inversa foi aplicada entre o conjunto de dados do método gravimétrico (variável dependente, X) com cada conjunto de dados obtido pelos tratamentos 2 a 13 (variável independente, Y), separadamente. A partir dessa análise foram obtidos os modelos lineares de 1º grau (Equação 3), que poderão ser utilizados na estimação da umidade do método gravimétrico ( $X_{h(novo)}$ ) a partir da umidade obtida pelo aparelho elétrico medidor de umidade ( $Y_{h(novo)}$ ).

De acordo com Ribeiro Júnior (2005), as primeiras etapas na análise de regressão consistem em obter as estimativas dos parâmetros  $\beta_0$  (ordenada à origem) e  $\beta_1$  (coeficiente angular), a partir de uma amostra de n pares de valores ( $X_i, Y_i$ ), utilizando-se o método dos mínimos quadrados. A partir das estimativas desses valores torna-se possível a construção das equações de regressão linear simples.

Obtidas as equações pela análise de regressão, processou-se ainda a análise de variância da regressão. Essa análise testou a significância do coeficiente angular estimado  $b_1$  (5% de probabilidade) de cada uma das equações ajustadas a partir das seguintes hipóteses:

$H_0: b_1 = 0$ , ou seja, não há regressão ou relação funcional entre as variáveis X e Y;

$H_1: b_1 \neq 0$ , ou seja, há regressão ou relação funcional entre as variáveis X e Y.

Tal procedimento encontra-se de acordo com Ribeiro Júnior (2001), que discute que a equação estimada obtida apenas estabelece uma relação entre as variáveis dependente e independente. Portanto, a mera obtenção da equação não

responde se a variável independente influencia significativamente na variável dependente.

Após a confirmação de que a equação ajustada era significativa, tomou-se a decisão pelo melhor modelo a partir da escolha do maior valor de coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Para a realização das análises estatísticas foi utilizado o software STATGRAPHICS CENTURION XVI.I.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Umidade entre tratamentos

De acordo com a Análise de Variância (ANOVA) realizada, foi obtido valor de F calculado ( $F_c$ ) igual a 1210,58\*\*, sendo significativo a 99% de confiança, ou seja, pelo menos duas médias dos tratamentos foram diferentes.

A relação das umidades médias obtidas nos tratamentos, suas amplitudes (máximo e mínimo), o coeficiente de variação (CV%) e o teste de médias estão representados na Tabela 2.

Tabela 2 – Média, amplitude e coeficiente de variação da umidade da madeira de teca por tratamento

Tratamento	Umidade	CV	Máximo	Mínimo
	média			
(%)				
1	11,37 c	5,96	12,44	10,26
2	8,47 a	4,25	9,5	8,0
3	11,81 d	3,65	12,9	11,3
4	15,39 f	3,21	16,6	14,8
5	8,61 a	4,27	9,6	8,0
6	11,93 d	3,48	13,1	11,2
7	15,58 f	3,22	17,0	14,7
8	9,52 b	4,12	10,3	8,9
9	13,00 e	3,36	13,9	12,3
10	16,78 g	3,09	17,9	15,9
11	9,44 b	4,31	10,4	8,9
12	12,86 e	3,45	13,8	12,2
13	16,65 g	3,16	18,0	15,9

CV: coeficiente de variação; Médias seguidas de uma mesma letra, em uma mesma coluna, não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey (5% de significância).

Fonte: A autora (2011).

Observou-se na Tabela 2 que nenhum dos tratamentos apresentou média estatisticamente igual a do gravimétrico, sendo assim, é necessária a utilização de equações de calibração para ajuste do aparelho em relação ao método gravimétrico.

Se algum tratamento apresentasse média estatisticamente igual a do gravimétrico, não seria necessária a construção de equações de calibração para ajuste do aparelho em relação ao método gravimétrico. Tal tratamento seria considerado ideal para determinar a umidade da madeira de teca pelo método resistivo.

A utilização do aparelho elétrico nos diferentes tratamentos, sem a correção da calibração, gerará, de acordo com a situação, resultados subestimados ou superestimados em relação ao método gravimétrico, que foi de 11,37%.

Em um estudo realizado por Pereira (2008) com espécies de pinus e eucalipto, constatou-se que as médias obtidas pelo aparelho elétrico resistivo, de acordo com a recomendação do fabricante, apresentaram leituras superiores às leituras do método da estufa, para ambas as espécies.

Ao analisarem-se os tratamentos 3 e 9, correspondentes à recomendação do fabricante (orientação paralela e escala 2), as médias obtidas pelo aparelho também foram superiores a do método gravimétrico, semelhante a Pereira (2008).

Comparando-se as escalas 1, 2 e 3, ou seja, isolando-se os fatores profundidade e orientação em relação à grã, notou que as médias entre as escalas realmente são diferentes (tratamentos 2 x 3 x 4; 5 x 6 x 7; 8 x 9 x 10; 11 x 12 x 13), conforme sugerido pelo fabricante. Desta forma, é relevante a informação do fabricante de utilização das escalas conforme a densidade da madeira.

Com respeito à orientação em relação à grã, para um mesmo tipo de agulha (1cm ou 2cm), notou-se que não houve diferença entre a orientação paralela ou perpendicular, visto que estas médias não foram estatisticamente diferentes (tratamentos 2 x 5, 3 x 6, 4 x 7, 8 x 11, 9 x 12, 10 x 13). Isso significa que o fator orientação da grã não foi significativo na utilização do medidor elétrico para a madeira de teca analisada nesse estudo. Esse resultado foi importante, pois simplifica a operação do aparelho, minimizando-se possíveis erros que poderiam ser produzidos caso houvesse diferença de umidade em relação à orientação com a grã.

Em relação à profundidade de penetração (1cm ou 2cm), observou-se que as médias são diferentes estatisticamente (tratamentos 2 x 8, 3 x 9, 4 x 10, 5 x 11, 6 x 12, 7 x 13), ou seja, a profundidade de penetração das agulhas influencia diretamente na umidade da madeira. Foi possível perceber que quanto mais profunda forem cravadas as agulhas, maior é a umidade média apresentada, o que significa que este fator foi significativo na operação do aparelho.

Os valores de coeficiente de variação (CV) de todos os tratamentos foram pequenos, proporcionando uma menor dispersão dos dados em relação a média. De acordo com Ribeiro Júnior (2005), o CV é uma medida adimensional e útil para comparar a variabilidade de diferentes amostras, cujas médias são muito desiguais ou as unidades de medidas são diferentes. Os baixos valores obtidos de CV significam que a coleta de dados foi adequada, demonstrando a qualidade da metodologia empregada.

#### **4.2 Análise de regressão inversa**

Na Tabela 3 encontram-se as equações obtidas pela análise de regressão inversa, com seus respectivos valores de F calculado ( $F_c$ ) da análise de variância da regressão e coeficiente de determinação ( $R^2$  %).

Com relação aos tratamentos 2 a 7, realizados a  $\frac{1}{4}$  da espessura (agulhas de 1 cm), o que obteve melhor resultado foi o tratamento 3, que obteve  $R^2$  igual a 23,54%. Apesar de o modelo ter sido estatisticamente significativo ( $F_c = 8,62^{**}$ ), o baixo valor de  $R^2$  indica que o modelo estimado explica pouco da relação entre as variáveis (X e Y). Dessa forma, a utilização deste modelo não é indicada para a calibração do aparelho, tampouco a utilização dos modelos obtidos nos tratamentos 2 e 4, que também foram significativos ( $F_c = 6,90^*$  e  $F_c = 7,29^*$ , respectivamente), mas obtiveram  $R^2$  inferiores.

Os tratamentos com orientação perpendicular à grã, para  $\frac{1}{4}$  da espessura (5, 6 e 7,) não foram significativos de acordo com seus valores de  $F_c$  ( $1,01^{ns}$ ,  $1,43^{ns}$  e  $1,20^{ns}$ , respectivamente) apresentando  $R^2$  muito baixo (3,47; 4,84 e 4,12 respectivamente), indicando que as equações geradas são inválidas. Portanto, essas equações não devem ser adotadas.

Tabela 3 – Equações obtidas pela análise de regressão inversa a partir do método gravimétrico e do medidor elétrico de umidade

Tratamentos	Equações	R <sup>2</sup> (%)	Fc
2	$\hat{X}_{h(\text{nov})} = \frac{Y_{h(\text{nov})} - 2,78}{0,24}$	19,77	6,90*
3	$\hat{X}_{h(\text{nov})} = \frac{Y_{h(\text{nov})} - 8,30}{0,31}$	23,54	8,62**
4	$\hat{X}_{h(\text{nov})} = \frac{Y_{h(\text{nov})} - 11,62}{0,33}$	20,66	7,29*
5	$\hat{X}_{h(\text{nov})} = \frac{Y_{h(\text{nov})} - 9,76}{(-0,10)}$	3,47	1,01 <sup>NS</sup>
6	$\hat{X}_{h(\text{nov})} = \frac{Y_{h(\text{nov})} - 13,47}{(-0,14)}$	4,84	1,43 <sup>NS</sup>
7	$\hat{X}_{h(\text{nov})} = \frac{Y_{h(\text{nov})} - 17,29}{(-0,15)}$	4,12	1,20 <sup>NS</sup>
8	$\hat{X}_{h(\text{nov})} = \frac{Y_{h(\text{nov})} - 4,03}{0,48}$	69,37	63,42**
9	$\hat{X}_{h(\text{nov})} = \frac{Y_{h(\text{nov})} - 6,66}{0,56}$	74,42	81,47**
10	$\hat{X}_{h(\text{nov})} = \frac{Y_{h(\text{nov})} - 9,83}{0,61}$	63,51	48,73**
11	$\hat{X}_{h(\text{nov})} = \frac{Y_{h(\text{nov})} - 4,86}{0,40}$	45,03	22,94**
12	$\hat{X}_{h(\text{nov})} = \frac{Y_{h(\text{nov})} - 7,46}{0,48}$	52,44	30,88**
13	$\hat{X}_{h(\text{nov})} = \frac{Y_{h(\text{nov})} - 11,06}{0,49}$	39,94	18,62**

$Y_{h(\text{nov})}$ : “novo” valor de umidade obtido pelo aparelho, na sua respectiva escala, utilizado para estimar a “nova” umidade do método gravimétrico ( $X_{h(\text{nov})}$ ). \*Significativo a 5% de probabilidade; \*\*Significativo a 1% de probabilidade; NS (não significativo).

Fonte: A autora (2011).

Em relação aos tratamentos a ½ da espessura (8 a 13), todos os modelos gerados foram altamente significativos (1% de probabilidade), conforme demonstrado pelos valores de Fc na Tabela 3.

Dentre os tratamentos com orientação paralela em relação à grã (8, 9 e 10), o tratamento 9 foi o que obteve o melhor modelo, uma vez que apresentou maior valor de R<sup>2</sup>, com 74,42%. De fato, o tratamento 9 foi o melhor dentre todos os tratamentos estudados, correspondendo a melhor metodologia de utilização do aparelho.

Dentre os tratamentos com orientação perpendicular em relação à grã (11, 12 e 13), o tratamento 12 foi o que obteve o melhor modelo, uma vez que apresentou maior valor de  $R^2$ , com 52,44%, seguido pelos tratamentos 11 e 13 (45,03% e 39,94%, respectivamente). No entanto, os baixos valores de  $R^2$  indicam que os modelos estimados explicam pouco da relação entre as variáveis (X e Y). Dessa forma, esses modelos não são os mais indicados para a calibração do aparelho, uma vez que para essa profundidade (1/2 da espessura) outros tratamentos obtiveram melhores modelos.

Embora o melhor modelo (tratamento 9) não tenha apresentado um valor de  $R^2$  tão elevado (74,42%), o mesmo ainda pode ser melhorado realizando-se uma análise de valores discrepantes (*outliers*), eliminando-se tais valores do conjunto de dados. O aumento do número de amostras também pode melhorar o ajustamento da equação, e pode ser objeto de pesquisa futura.

Houve diferença significativa entre as médias de acordo com as escalas. A escala 2 realmente foi a melhor escala de utilização do aparelho para a madeira de teca, independente da profundidade de medição (1/2 ou 1/4 de espessura) e da orientação em relação à grã (paralela ou perpendicular), conforme a discussão feita anteriormente com relação à significância dos modelos e valores de  $R^2$ . Esse resultado confirma a recomendação do fabricante do aparelho.

Batista *et al.* (2010) estudaram a melhor escala de operação de um aparelho elétrico medidor de umidade, para a espécie *Acacia mangium*. A escala recomendada pelo fabricante para a medição de madeiras de densidade baixa, como a *Acacia mangium*, é a escala 1, e a melhor encontrada no estudo dos autores, foi a 2. Desta forma, como o fabricante faz recomendação de escala a partir da densidade da madeira, conclui-se que, nem sempre esse fator é o mais confiável para a recomendação da escala a utilizar.

Esse tipo de diferença pode ser encontrado, visto que existem outros fatores, tais como o teor de extrativos, que também podem influenciar nos resultados da escolha da melhor escala.

Batista, Klitzke e Savioli (2008) estudaram a determinação da melhor escala de operação de um aparelho resistivo medidor de umidade para as espécies pinus (*Pinus* sp), eucalipto (*Eucalyptus* sp), cumaru (*Dipteryx odorata*), tamarindo

(*Tamarindus indica*) e muiracatiara (*Astroniu lecointe*). Os autores concluíram que as espécies pinus, cumaru e eucalipto apresentaram modelos estatisticamente confiáveis (99% de confiança), com valores de  $R^2$  de 79,00%, 81,82% e 97,27%, respectivamente. Portanto, os valores de  $R^2$  obtidos por esses autores foram superiores aqueles obtidos nesse estudo.

Ressalta-se que os autores utilizaram orientação das agulhas paralelas às fibras e espessura de penetração (1/3) conforme recomendação do fabricante do aparelho, o que pode justificar os maiores valores de  $R^2$ .

Com relação à muiracatiara, Batista, Klitzke e Savioli (2008) obtiveram modelo significativo (95% de confiança), porém com valor baixo de  $R^2$  (48,78%), demonstrando que a equação obtida não foi adequada para estimar os valores de umidade real. Resultados semelhantes foram obtidos nos tratamentos 2, 3, 4, 11, 12 e 13. No estudo desses autores, somente para a espécie tamarindo não houve significância entre a umidade determinada pelo aparelho e pelo método gravimétrico, como também ocorreu nos tratamentos 5, 6 e 7.

Deve-se ressaltar que todos os resultados obtidos são válidos para a madeira de teca na amplitude de umidade de 10,26 a 12,44%, que corresponde aos valores mínimo e máximo, respectivamente, obtidos no método gravimétrico, que é considerado o mais preciso.

#### **4.3 Perfil da umidade em relação ao comprimento da tábua**

Na Figura 6 encontra-se o perfil de variação de umidade ao longo do comprimento da tábua, a partir dos dados obtidos no método gravimétrico.

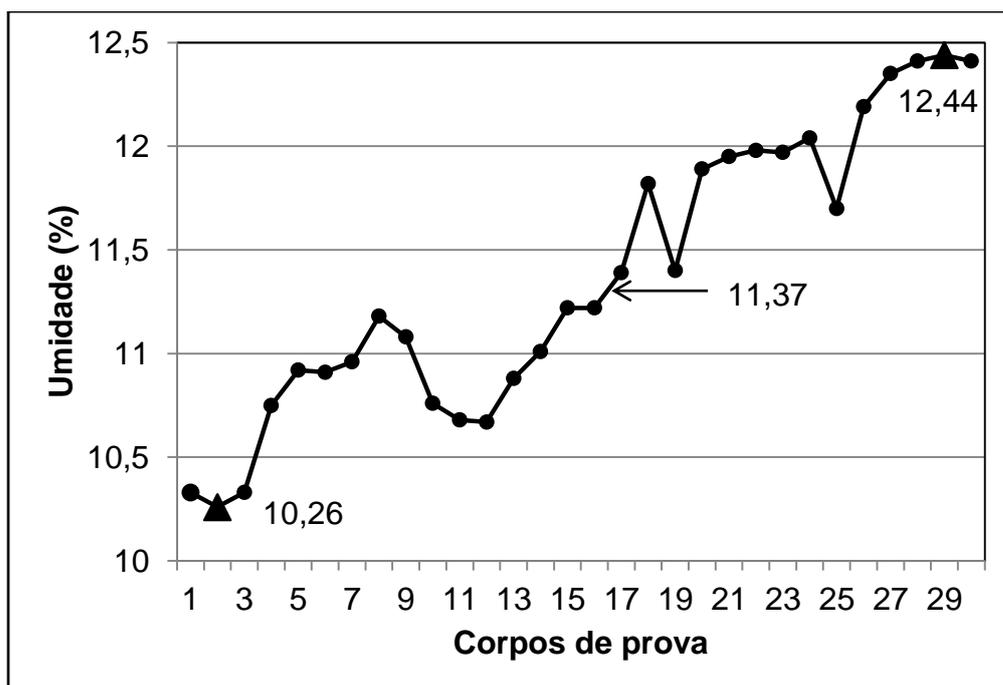


Figura 7 – Umidade ao longo da tábua de teca de acordo com o método gravimétrico  
 Fonte: A autora (2011).

A tendência geral da variação da umidade ao longo da tábua foi crescente, com mínimo, média e máximo de 10,26%, 11,37% e 12,44%, respectivamente, como destacado na Figura 6. Portanto, a diferença máxima de umidade dentro da tábua foi de 2,18 pontos percentuais, comprovando que a secagem natural produz um grande gradiente de umidade em uma mesma peça, o que pode ser prejudicial de acordo com a aplicação final da madeira.

A umidade da madeira tem a tendência ser menor nas extremidades da tábua e ir aumentando de acordo com a aproximação do centro da mesma (SIMPSON, 1991). No entanto, essa afirmação não correspondeu ao obtido, visto que a tendência da umidade foi sempre crescente ao longo do comprimento da tábua. Pode-se supor nesta situação que a tábua tenha sido serrada à metade do seu comprimento inicial.

Na Figura 7 encontra-se o perfil de variação da umidade obtido pelo método resistivo de acordo com as profundidades de penetração de 1cm e 2 cm. Para a construção deste gráfico utilizaram-se os resultados obtidos nos tratamentos 3 e 9,

em que ambos utilizaram a escala 2 e foram paralelos à grã, correspondentes aos melhores resultados.

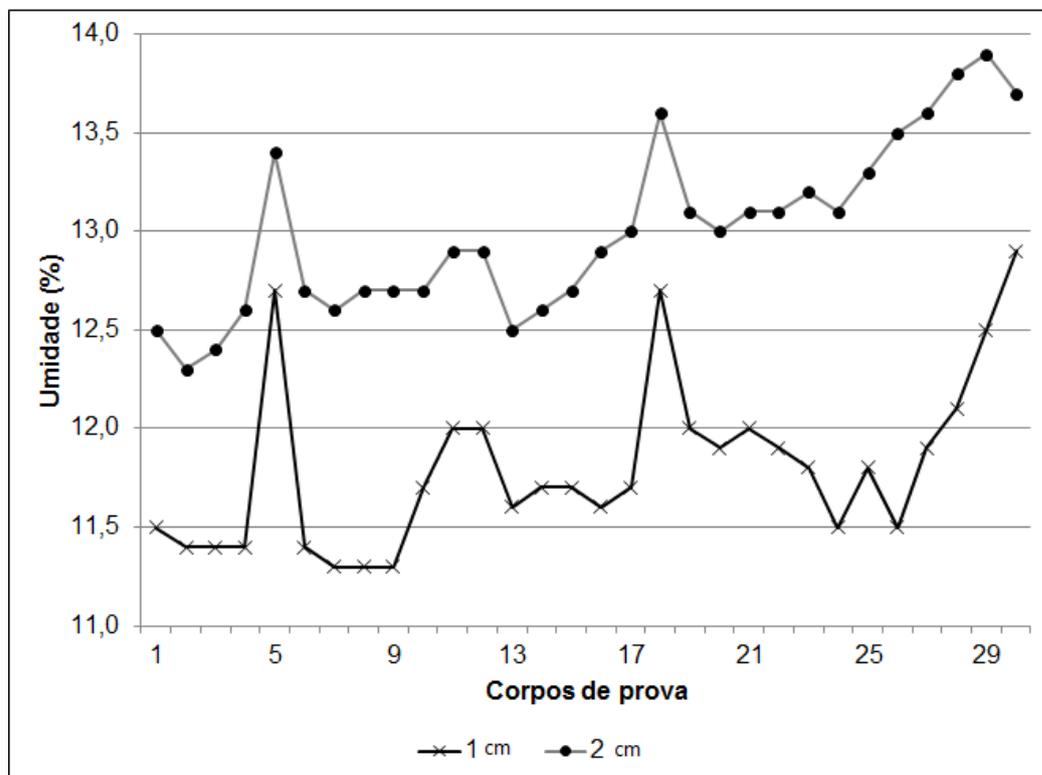


Figura 8 – Perfil de umidade da tábua de teca pelo método resistivo

Fonte: A autora (2011).

De acordo com a Figura 7 foi possível verificar que a umidade pelo método resistivo foi maior nas porções mais internas da madeira do que nas porções mais externas. Esse resultado apenas corrobora com o discutido no item 4.1 e comprova o proposto por Simpson (1991) de que existe um gradiente de umidade na espessura das tábuas.

Apesar de a tábua utilizada ser proveniente de secagem natural, a diferença média de umidade de acordo com a espessura foi de aproximadamente 1 ponto percentual, que pode ser considerada pequena. Gradientes de umidade elevados são indesejáveis, pois resultam em maiores defeitos nas peças após o posterior processamento mecânico da madeira.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho conclui-se que:

- Não houve diferença nos resultados de acordo com a orientação paralela ou perpendicular da grã da madeira em relação aos eletrodos do aparelho;
- A umidade da madeira de teca foi maior nas camadas mais internas do que nas mais externas, indicando que o fator profundidade de penetração das agulhas foi significativo na utilização do aparelho;
- Houve diferença significativa entre as escalas do aparelho, em que a melhor escala para a madeira de teca foi a 2, comprovando o recomendado pelo fabricante;
- A melhor metodologia de utilização do aparelho para madeira de teca foi obtida à profundidade de  $\frac{1}{2}$  da espessura da tábua, orientação paralela dos eletrodos do aparelho em relação à grã da madeira, utilizando-se a escala 2 (tratamento 9). Para tal, deve-se utilizar a seguinte equação de calibração:

$$\hat{X}_{h(\text{nov})} = \frac{Y_{h(\text{nov})} - 6,66}{0,56}$$

- Recomenda-se a realização de um estudo utilizando-se agulhas correspondentes a  $\frac{1}{3}$  da espessura das peças, com o objetivo de se obterem melhores modelos de calibração;
- Recomenda-se a análise do teor de extrativos da madeira, visando à utilização desse fator em modelos de regressão múltipla para a calibração do aparelho elétrico resistivo medidor de umidade.

## 6 REFERÊNCIAS

- ANGELI, A. ***Tectona grandis (Teca)***. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Piracicaba. 2003. Disponível em: <<http://www.ipef.br>>. Acesso em: 10 nov. 2010.
- BATISTA, D. C. *et al.* Determinação da melhor escala de operação de um aparelho elétrico medidor de umidade. In: VI SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS E II SIMPÓSIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA DO RJ, 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 2010. 1 CD. Trab.325.
- BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; SAVIOLI, D. L. Equação de Regressão Linear para Adequação de Aparelhos Elétricos de Umidade do Tipo Resistivo. **XI Encontro Brasileiro em Madeira e Estruturas de Madeira**. Londrina, jun. 2008.
- CALONEGO, F. W. *et al.* Avaliação do teor de umidade da madeira de *Eucalyptus grandis* por medidores elétricos resistivos. **Revista do Instituto Florestal**. São Paulo, v. 18, n. único, p. 71-78, dez. 2006.
- COSTA, T. M. S.; OLIVEIRA, R. S.; LUNA, A. S. Utilização de planilha eletrônica para calibração instrumental, análise da variância e testes de significância de um método espectrométrico. **Revista Analytica**, Rio de Janeiro, n.21, p. 46-51, fev./mar. 2006.
- DIGISYSTEM. **Medidor de umidade para madeiras DL 822 & DUP 8805**. Curitiba, Manual, revisão V03, 18 p. 2006.
- FIGUEIREDO, E. O. **Reflorestamento com Teca (*Tectona grandis* L.f.) no Estado do Acre**. EMBRAPA ACRE Rio Branco, 2001. 28 p. (EMBRAPA ACRE – Documentos, 65).
- FIGUEIREDO, O. E., OLIVEIRA, L. C.; BARBOSA, L. K. F. Teca (*Tectona grandis* L.f.): Principais Perguntas do Futuro Empreendedor Florestal. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa**. Acre, jul. 2005.
- FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, A. D.; SCOLFORO, J. R. S. Análise econômica de povoamentos não desbastados de *Tectona grandis* L.f., na microrregião do Baixo Rio Acre. **Cerne**, Lavras, v.11, n.4, p.342-253, out./dez. 2005.
- GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. Secagem racional da madeira. São Paulo: Nobel, 1985. 111p.
- JANKOWSKY, I. P. **Fundamentos da secagem de madeira**. Piracicaba, SP: (Documentos Florestais), 1990. 9 p. Disponível em: <<http://www.ltpf.ufra.edu.br/bibliografia/fundamentos.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2011.

JANKOWSKY, I. P. **Guia Florestal**. Disponível em: <<http://www.guiaflorestal.com.br/?pg=lerartigo&id=89>>. Acesso em: 03 de nov. 2010.

JANKOWSKY, I. P.; GALVÃO, A. P. M. Influência do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira. São Paulo: IPEF n.18, jun.1979. p.1-33.

KLITZKE, R. J. Secagem da madeira. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Org.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro**. Jerônimo Monteiro, ES: Suprema Gráfica, 2007. P. 271-341.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas- possibilidades e métodos de povoamento sustentado**. Eschborn: Instituto de Silvicultura da Universidade de Göttingen, 1990. p.310-313.

LORENZI, H. *et al.* Árvores Exóticas no Brasil: madeiras, ornamentais e aromáticas. **Nova Odessa**, SP: Instituto Plantarum, 2003. 384 p.

MACEDO, R. L. G. *et al.* Dinâmica de estabelecimento de *Tectona grandis* L.f. (Teca) introduzida em cafezal na região de Lavras – Minas Gerais. **O Brasil Florestal**, Brasília, n. 73, p. 31-38, 2002. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/ojs/index.php/braflor/article/view/104>>. Acesso em: 21 nov. 2010.

MOTTA, J. P. **Propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis* L.f. proveniente do vale do rio doce, Minas Gerais**. 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2011.

OGLIARI, P. J. **Outros tópicos na análise de regressão**, 2011. Disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~ogliari/>>. Acesso em: 17 out. 2011.

PEREIRA, J. T. M. **Avaliação de equipamento medidor elétrico resistivo de umidade da madeira utilizando amostras de eucalipto e pinus**. 2008. 24 f. Monografia (Engenharia Florestal) – Graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

REMADE. **Revista da Madeira**, Curitiba, abr. 2004a. Disponível em:<[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=545&subject=Secagem&title=Estudo%20detalha%20benef%EDcios%20do%20equil%EDbrio%20da%20umidade](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=545&subject=Secagem&title=Estudo%20detalha%20benef%EDcios%20do%20equil%EDbrio%20da%20umidade)>. Acesso em: 03 nov. 2010.

REMADE. **Revista da Madeira**, Curitiba, dez. 2004b. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=665&subject=Madeira%20E2%80%93%20Teca&title=Qualidade%20e%20aspecto%20r%C3%BAstico%20agradam%20mercado](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=665&subject=Madeira%20E2%80%93%20Teca&title=Qualidade%20e%20aspecto%20r%C3%BAstico%20agradam%20mercado)>. Acesso em: 08 nov. 2010.

RIBEIRO JÚNIOR, J. I. **Análises Estatísticas no SAEG**. Viçosa, MG. UFV. 301p, 2001.

RIBEIRO JÚNIOR, J. I. Análises estatísticas no Excel: Guia prático. Viçosa, MG. UFV. 251p. 2005.

SANTOS, A. M. M. *et al.* Comparação de misturas de solventes para extração de extrativos de madeira em *Pinus* sp. In: X JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO – JEPEX, 2010, Recife. **Resumo.** Disponível em: <<http://www.sigeventos.com.br/jepex/inscricao/resumos/0001/R1286-1.PDF>>. Acesso em: 24 out. 2011.

SKAAR, C. **Water in Wood.** New York: Syracuse University Press, 1972. 218 p.

SEVERO, E. T. D. A secagem da madeira de eucalipto e seus desafios. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Org.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro II.** Vitória, ES: Aquarius, 2007. P. 185-216.

SIMPSON, W.T. **Dry kiln operator's manual.** Madison: USDA/FS/FPL, 1991. 274.

TSUKAMOTO FILHO, A. A.; SILVA, M. L.; COUTO, L.; MÜLLER, M. D. Análise econômica de um plantio de teca submetido a desbastes. **Revista árvore**, Viçosa, v.27, n.4, p.487-494. ago 2003.

WIEDENHOEFT, A. Structure and Function of Wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook** - wood as an engineering material. Madison, 2010. cap. 3, p. 1-18.