

**DETERMINAÇÃO DE GRADIENTES DE UMIDADE EM  
MADEIRA POR ATENUAÇÃO DE RADIAÇÃO GAMA  
DO <sup>241</sup> Am**

**ODERLI DE AGUIAR**

**Orientador: Epaminondas Sansigolo B. Ferraz**

**Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Energia Nuclear na Agricultura.**

**PIRACICABA  
Estado de São Paulo - Brasil  
Fevereiro, 1980**

Aos meus pais,

Antonio (in memoriam) e Margarida,

que me deram a vida e um

objetivo para vivê-la,

O F E R E Ç O

Aos meus irmãos e

amigos,

D E D I C O

## AGRADECIMENTOS

### Agradeço

- ao *Dr. Epaminondas Sansigolo de Barros Ferraz*, pela orientação, amizade e estímulo constantes, durante a realização deste trabalho;
- à *Universidade Federal de Viçosa*, por ter me proporcionado a oportunidade de realizar este trabalho;
- ao *Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA)*, pelas facilidades oferecidas para a realização deste trabalho;
- ao *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico*, pela concessão de uma bolsa de estudos;
- aos Professores *Helládio do Amaral Mello*, *Ivaldo P. Jankowski*, *Luis Ernesto G. Barrichelo*, *Antonio Paulo M. Galvão*, *José Nivaldo Garcia* e *Mário Tomazello Filho*, do Departamento de Silvicultura da ESALQ/USP, pelas valiosas colaborações;
- ao Eng<sup>o</sup> Agr<sup>o</sup> *Clóvis Angeli Sansigolo*, pela amizade e ajuda inestimáveis;
- aos Professores *Virgílio Franco do Nascimento Filho*, do Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ/USP e CENA e *Ricardo Bohrer Sgrillo*, do CENA, pela ajuda e amizade;
- aos Professores *Francisco José Krug*, *Valdomiro Correa de Bittencourt* e *Akihiko Ando*, do CENA, pelo apoio na parte experimental deste trabalho;

.iii.

- ao Auxiliar Técnico de Laboratório *Edivaldo Modesto de Abreu*, da Seção de Instrumentação e Controle do CENA, pela constante colaboração e amizade;
- às Bibliotecárias *Janete L. Bombini de Moura* e *Rosa Maria V.B. Oliveira*, do CENA, e *Marialice Poggiani* e *Maria Helena Rodrigues*, do Departamento de Silvicultura da ESALQ/USP, pela atenção a mim dispensada;
- ao Sr. *João Eduardo Pilotto*, pela datilografia dos originais deste trabalho e pela amizade sempre demonstrada;
- ao Sr. *Ariovaldo Miguel de Carvalho*, pela ajuda na elaboração do fluxograma de computação dos dados;
- aos colegas do Curso de Pós-Graduação e demais funcionários do CENA, pelo convívio, amizade e compreensão a mim proporcionados.

INDICEPágina

|  |    |
|--|----|
| 1. RESUMO .....  | 1  |
| 2. INTRODUÇÃO .....  | 2  |
| 3. REVISÃO DE LITERATURA .....   | 4  |
| 3.1. Uso de radiação no estudo de propriedades de madeira .....                              | 4  |
| 3.2. Métodos de determinação de umidade de madeira .....                                     | 6  |
| 3.3. Determinação de gradientes de umidade em madeira .....                                  | 9  |
| 3.4. Densidade da água adsorvida na madeira .....  | 10 |
| 4. TEORIA .....  | 14 |
| 4.1. Propriedades físicas da madeira .....   | 14 |
| 4.2. Atenuação de um feixe monoenergético de radiação $\gamma$ numa amostra de madeira ..... | 18 |
| 4.3. Erros na determinação de umidade .....  | 24 |
| 5. MATERIAL E MÉTODOS .....  | 30 |
| 5.1. Instrumental de detecção de radiação $\gamma$ .....                                     | 31 |
| 5.1.1. Geometria e equipamento .....   | 31 |
| 5.1.2. Detecção e contagens .....  | 33 |
| 5.2. Densidade da água adsorvida .....   | 36 |
| 5.2.1. Material .....  | 36 |
| 5.2.2. Coeficientes de atenuação de massa .....  | 37 |
| 5.2.3. Determinação experimental .....   | 39 |
| 5.3. Ponto de saturação de fibra .....   | 41 |
| 5.4. Gradientes de umidade na madeira durante sua secagem .....                              | 42 |
| 5.4.1. Preparação da câmara .....  | 42 |
| 5.4.2. Preparação das amostras .....   | 43 |
| 5.4.3. Determinação experimental .....   | 44 |

|   |    |
|---|----|
| 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....               | 49 |
| 6.1. Coeficientes de atenuação de massa ..... | 49 |
| 6.2. Densidade da água adsorvida .....        | 50 |
| 6.3. Ponto de saturação de fibra .....        | 53 |
| 6.4. Gradientes de umidade .....              | 56 |
| 7. CONCLUSÕES .....                           | 74 |
| 8. SUMMARY .....                              | 76 |
| 9. LITERATURA CITADA .....                    | 77 |

## LISTA DAS TABELAS

| <u>Tabela</u>  | <u>Página</u> |
|--|---------------|
| - Valores de temperatura ( $\underline{t}$ , °C) e umidade relativa ( $\underline{UR}$ , %) nas sucessivas etapas de condicionamento das amostras ...                                      | 39            |
| 2 - Coeficientes de atenuação de massa experimentais e teóricos da água e das espécies de madeira estudadas .....  | 49            |
| 3 - Densidade da água adsorvida na madeira ( $\underline{d}_a$ , g/cm <sup>3</sup> ) em função da umidade da madeira ( $\underline{U}$ , %) .....  | 51            |
| 4 - Retratibilidade volumétrica porcentual ( $\underline{R}_v$ , %) de <i>Pinus oocarpa</i> em função da umidade da madeira ( $\underline{U}$ , %) .....                                   | 53            |
| 5 - Distribuição de umidade ( $\underline{U}$ , %) na amostra nº 1, em diferentes instantes da secagem ( $\underline{t}$ , dia) .....  | 57            |
| 6 - Distribuição de umidade ( $\underline{U}$ , %) na amostra nº 2, em diferentes instantes da secagem ( $\underline{t}$ , dia) .....  | 58            |
| 7 - Distribuição de umidade ( $\underline{U}$ , %) na amostra nº 3, em diferentes instantes da secagem ( $\underline{t}$ , dia) .....  | 59            |
| 8 - Distribuição de umidade ( $\underline{U}$ , %) na amostra nº 4, em diferentes instantes da secagem ( $\underline{t}$ , dia) .....  | 60            |
| 9 - Distribuição de umidade ( $\underline{U}$ , %) na amostra nº 5, em diferentes instantes da secagem ( $\underline{t}$ , dia) .....  | 61            |
| 10 - Coeficientes das regressões relativas às distribuições de umidade em 15 instantes ( $\underline{t}$ , dia) da secagem .....   | 67            |
| 11 - Umidades de madeira obtidas pelos métodos gama ( $\underline{U}$ , %) e gravimétrico ( $\underline{U}_{grav.}$ , %) em diferentes instantes da secagem ( $\underline{t}$ , dia) ..... | 69            |
| 12 - Erros das medidas envolvidas na determinação da umidade da madeira pelo método gama .....   | 73            |

## LISTA DAS FIGURAS

| <u>Figura</u>   | <u>Página</u> |
|---|---------------|
| 1 - Densidade da água adsorvida na madeira ( $d_a$ , g/cm <sup>3</sup> ) em função da umidade da madeira ( $\underline{U}$ , %) - (MacLEAN, 1952) ..... | 12            |
| 2 - Modelo simplificado da atenuação de um fóton numa amostra de madeira .....  | 19            |
| 3 - Erro relativo teórico ( $ \delta U $ , %) da medida de umidade pelo método gama, em função da umidade da madeira ( $\underline{U}$ , %) .....       | 29            |
| 4 - Esquema da geometria utilizada na atenuação de radiação $\gamma$ por amostras de madeira .....  | 31            |
| 5 - Espectro do <sup>241</sup> Am obtido com sistema de boa colimação e janela de 2 keV .....   | 34            |
| 6 - Sistema de medida utilizado, já instalado dentro da camera  | 45            |
| 7 - Visão geral das amostras durante a secagem na camera  | 45            |
| 8 - Fluxograma de entrada e computação dos dados para a determinação de umidade de madeira ( $\underline{U}$ , %) .....                                 | 48            |
| 9 - Densidade da água adsorvida na madeira ( $d_a$ , g/cm <sup>3</sup> ) em função da umidade da madeira ( $\underline{U}$ , %) .....                   | 52            |
| 10 - Retratibilidade volumétrica porcentual ( $R_v$ , %) da madeira de <i>Pinus oocarpa</i> em função de sua umidade ( $\underline{U}$ , %) .....       | 55            |
| 11 - Gradientes de umidade da amostra nº 1, em diferentes instantes da secagem .....  | 62            |



Figura

Página

|    |  |    |
|----|--|----|
| 12 | Gradientes de umidade da amostra nº 2, em diferentes instantes da secagem  | 63 |
| 13 | - Gradientes de umidade da amostra nº 3, em diferentes instantes da secagem .....  | 64 |
| 14 | - Gradientes de umidade da amostra nº 4, em diferentes instantes da secagem .....  | 65 |
| 15 | - Gradientes de umidade da amostra nº 5, em diferentes instantes da secagem .....  | 66 |
| 16 | - Correlação entre as umidades de madeira obtidas pelos métodos gama ( $\underline{U}$ , %) e gravimétrico ( $\underline{U}_{\text{grav.}}$ , %) ..... | 71 |

---

## 1. RESUMO

---

---

Uma nova metodologia para a determinação de gradientes de umidade em madeira foi desenvolvida, baseada na atenuação de radiação gama de baixa energia. Foram propostas duas equações para a determinação da umidade, abaixo e acima do ponto de saturação de fibra da madeira. Os erros envolvidos na determinação de umidade foram previstos teoricamente e o método comparado com o método gravimétrico.

Um novo procedimento para determinar a dependência entre a densidade da água adsorvida na madeira e a umidade da madeira foi descrito. Verificou-se que, na faixa de umidade de 5 a 25%, a densidade da água adsorvida cresce com a diminuição de umidade, atingindo até  $1,153 \text{ g/cm}^3$ . A determinação dos gradientes foi rápida, não-destrutiva e mostrou-se sensível e de boa exatidão, na faixa de umidade de 9 a 150%. Os erros experimentais obtidos foram cerca de 4% para umidades acima do ponto de saturação de fibra, e 10% para umidades abaixo deste ponto.

---

## 2. INTRODUÇÃO

---

---

A madeira, material orgânico de estrutura complexa e heterogênea, e um meio poroso, altamente higroscópico, que apresenta várias alterações de suas propriedades físico-mecânicas associadas aos fenômenos de adsorção e dessorção de umidade.

O conhecimento dos mecanismos físicos que regem estes fenômenos é de suma importância em muitas fases do processamento da madeira, como a secagem racional, a obtenção de boas juntas de colagem, aplicação de revestimentos e seu subsequente uso em ambientes os mais diversos.

A existência de elevados gradientes de umidade na madeira durante seu processamento ou uso pode ocasionar empenamentos, rachaduras, "endurecimento superficial" e outros problemas. A avaliação destes gradientes e o conhecimento de sua evolução no tempo apresenta, portanto, fundamental importância, tanto para a realização de pesquisas básicas, tais como estudos de fluxo de água livre e difusão de água adsorvida na madeira, como também para a solução de problemas práticos e tecnológicos, como

por exemplo, a otimização dos processos de secagem da madeira.

O acompanhamento destes gradientes, no tempo e no espaço, em uma amostra de madeira, é, no entanto, bastante difícil quando se usa a metodologia tradicional, por ser esta destrutiva, morosa e de pouca confiabilidade. Com o advento da era nuclear, o uso de radiação em estudos de propriedades físicas de materiais tem se difundido. Assim, tem-se tornado de grande interesse para os tecnólogos de madeira estudar a exequibilidade do uso de radiação em medidas rápidas, exatas e não-destrutivas de propriedades de madeira. Entretanto, devido à complexidade advinda da interação água-madeira, não se tem desenvolvido um método prático e sensível para a determinação de gradientes de umidade em madeira.

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver, a partir da teoria de interação da radiação gama com a matéria, uma metodologia que possibilite a determinação de gradientes de umidade em madeira e que contribua, de forma significativa, em estudos acerca da interação água-madeira.

---

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

---

---

#### 3.1. Uso de radiação no estudo de propriedades de madeira

A radiação tem se manifestado, ao longo dos anos, uma boa ferramenta no estudo de propriedades de madeira. *GILLWALD (1960)* discute os princípios básicos de planejamento de experimentos com isótopos radioativos e suas possíveis aplicações em pesquisa de madeira, tais como em medidas de densidade, espessura e umidade. Estudos de difusão e movimentos de líquidos com traçadores radioativos e o uso de radiação na preservação de madeira são também sugeridos.

Outra aplicação importante é descrita por *LEE (1961)* que, usando raios-X de Cu, monocromatizados com filtro de Ni, estuda a cristalinidade da celulose de várias espécies de madeira. Mais recentemente, cristalografia de raio-X tem sido usada na determinação de celuloses nativa, regenerada e mercerizada (*BLACKWELL et alii, 1978*).

Radiação beta de  $^{90}\text{Sr}$  tem sido utilizada por *HARRIS (1969)*

em identificação de anéis de crescimento, estimativa da espessura das paredes celulares dos traqueídes e medidas de densidade e teor de resina de madeira. A teoria do método de determinação de densidade usando-se radiação beta já tinha sido descrita detalhadamente por *KLEUTERS (1964)*, que discutiu as condições ótimas experimentais e as vantagens do método entre as quais a possibilidade de se determinar a variação de densidade ao longo dos anéis de crescimento.

*POLGE e NICHOLLS (1972)* descrevem um método de determinação de densidade usando-se raios-X moles. Ressaltam que para tal, no entanto, é necessário que a amostra tenha espessura constante e umidade uniformemente distribuída, ao mesmo tempo que o feixe incidente de raios-X seja paralelo à direção longitudinal.

Os métodos de determinação de densidade de madeira pelo uso de raios-X ou radiação beta, apesar de apresentarem boa exatidão, têm sua aplicação limitada pela espessura da amostra. Para que haja sensibilidade nas determinações, a espessura média das amostras não deve exceder 1,0 cm para raios-X moles e 2,0 cm para radiação beta (de  $^{90}\text{Sr}$ ) (*LOOS, 1965*). Em várias situações, no entanto, é necessário trabalhar-se com amostras mais espessas. Nesses casos, o uso de radiação gama tem se mostrado bastante adequado, pois pode-se trabalhar com amostras de vários centímetros de espessura.

*PARRISH (1961)*, testando várias fontes radioativas, verificou que, usando-se radiação gama de 23 keV e 135 keV para espécies pouco e muito densas, respectivamente, há sensibilidade na determinação de densidade e na detecção de defeitos internos em discos de madeira. Já ra-

dição gama de baixa energia (5,6 keV) do  $^{55}\text{Fe}$  e altamente colimada tem sido utilizada por *WOODS* e *LAWHON* (1974) na determinação da variação da densidade ao longo dos anéis de crescimento. Neste caso, apesar da alta resolução obtida, a distribuição de densidade apresentada é relativa, uma vez que não foi feita correção para a umidade (cerca de 12%) da amostra. Já *FERRAZ* (1976), usando radiação gama de 60 keV do  $^{241}\text{Am}$ , com boa colimação, obteve distribuição absoluta de densidade desde que, antes de efetuada a varredura, a amostra foi seca em estufa. Em trabalho mais recente, *PINTO* (1978) determinou densidade de madeira utilizando-se de um feixe largo e colimado de radiação gama do  $^{241}\text{Am}$ .

Apesar de o uso de radiação no estudo de propriedades de madeira ter se difundido, como visto acima, sua aplicação na determinação de umidade tem se restrito a poucos trabalhos, entre os quais se destaca o de *LOOS* (1961). Este, usando radiação gama de 47 keV emitida por uma fonte de  $^{210}\text{Pb}$  de 1 mCi de atividade, determinou a atenuação da radiação em amostras de 6 cm de espessura, condicionadas a 4 teores distintos de umidade. Aplicando a lei de atenuação de Beer aos dados obtidos obteve uma equação de regressão correlacionando o coeficiente de atenuação de massa com a densidade e umidade da madeira. A equação obtida, no entanto, mostrou-se válida apenas para a espécie estudada e umidades abaixo do ponto de saturação de fibra.

### 3.2. Métodos de determinação de umidade de madeira

Há vários métodos de determinação de umidade de madeira (massa de água por massa de madeira seca), os quais, muitas vezes, apre-

sentam resultados divergentes, seja devido a limitações técnicas ou à variabilidade da madeira em geral.

Dentre esses métodos, o considerado como referência é o gravimétrico que, muitas vezes destrutivo, fundamenta-se na permanência da amostra em estufa, normalmente a  $(105 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ , até que sua massa atinja um valor praticamente constante. Segundo *KOLLMANN* e *CÔTÉ JR.* (1968), além de o método ter longa duração (cerca de 30 h para amostras de 100 g, por exemplo), pode levar a resultados errôneos quando a madeira contém ou tras substâncias voláteis além da água. Nesse caso, é usualmente recomendado o método de destilação que consiste-se no aquecimento da madeira imersa em líquido imiscível em água que funciona como solvente para os outros constituintes voláteis. Apesar de haver, assim, uma separação da água destes outros constituintes, tem-se como limitação desse método a inexactidão envolvida na medida do volume de água (*SKAAR, 1972*). Quando melhor exatidão é requerida, como na determinação de isothermas de sorção de espécies contendo estes constituintes, o método de Karl Fischer apresenta-se o mais adequado, sendo a umidade medida por titulação usando-se solução metanólica de iodo, dióxido de enxofre e piridina (*RESCH e ECKLUND, 1963*). No entanto, esse método requer muito tempo (cerca de 6 h) e seu custo é maior que os anteriores descritos (*KOLLMANN e CÔTÉ JR., 1968*). Outra limitação dos métodos de destilação e titulação é o fato de que, por serem destrutivos (as amostras são transformadas em cavacos), apresentam-se inadequados para vários tipos de estudos.

A umidade da madeira pode ser determinada também indiretamente por meio de um relacionamento entre a quantidade de água presente e um parâmetro físico mensurável. O medidor elétrico de umidade a corren-



te contínua, por exemplo, opera baseado no princípio de que a resistividade da madeira varia com sua umidade, dentro de um grande intervalo de umidade. Segundo *SKAAR (1964)*, além de haver necessidade de obtenção de curvas de calibração para várias espécies devido à variabilidade de densidade, o medidor não é adequado para determinação de umidades abaixo de 6% e acima de 30%.

Já o medidor elétrico de umidade a corrente alternada baseia-se no princípio de que a constante dielétrica da madeira varia acentuadamente com a sua umidade, a uma dada frequência. No entanto, como é necessário ter-se a curva de calibração para uma dada espécie, eventuais variações em torno de sua densidade média podem também induzir erros na determinação de umidade (*SKAAR, 1972*). Segundo este autor, o medidor não é muito adequado para medidas de umidade acima do ponto de saturação de fibra (cerca de 30%). *KOLLMANN e CÔTÈ JR. (1968)* discutem outras possíveis fontes de erro no uso de medidores elétricos, como a distribuição desuniforme da umidade na amostra, o comprimento do eletrodo de agulha e a direção da grã. Assim, apesar de os métodos elétricos de medida serem não-destrutivos e rápidos, seu grau de exatidão muitas vezes não é tão alto quanto o método gravimétrico (*RESCH e ECKLUND, 1963*). Estes autores observaram que, para espécies com constituintes voláteis, as medidas obtidas pelo método Karl Fischer diferem significativamente daquelas obtidas com medidores elétricos. A partir daí, propuseram um fator de correção para as determinações feitas com os medidores elétricos.

O emprego de técnicas vibracionais na determinação não-destrutiva de propriedades de madeira tornou-se destacado nos últimos 30 anos. Um parâmetro vibracional, relacionado à fricção interna da madei-

ra, pode ser utilizado na determinação de sua umidade (JAYNE, 1959). Segundo MOSLEMI (1968), este método só é adequado na determinação de umidade abaixo do ponto de saturação de fibra e uniformemente distribuída na amostra.

NANASSY (1973) apresenta um método de determinação de umidade a partir da linha do espectro de ressonância nuclear magnética (NMR). Além de discutir os principais problemas técnicos do método, determina experimentalmente as curvas de calibração necessárias. Analisando as medidas de umidade efetuadas, verificou que, em média, o erro relativo ao método gravimétrico foi da ordem de 3% e que só houve diferença significativa entre as curvas de calibração das duas espécies utilizadas, para umidades superiores a 60%. Observou também que o método, apesar da boa exatidão, apresenta desvantagens como o alto custo do aparelho de análise, limitação do tamanho da amostra (volume médio de 2 cm<sup>3</sup>) e o tempo relativamente longo para uma medida (cerca de 15 minutos). Em estudos posteriores, NANASSY (1978) verifica que as medidas obtidas por este método são independentes da temperatura da amostra, no intervalo de -30°C a 100°C.

### 3.3. Determinação de gradientes de umidade em madeira

A existência de elevados gradientes de umidade durante a secagem da madeira é a causa principal do aparecimento de problemas como empenamentos, rachaduras e "endurecimento" das amostras (SKAAR, 1972). O conhecimento da distribuição de umidade e intensidade dos gradientes durante a secagem pode ser útil na prevenção destes problemas (MOSLEMI, 1968), ao mesmo tempo que é de fundamental importância em estudos de difu

são da água na madeira, seja pela teoria clássica (HART, 1964; BRAMHALL, 1976) ou por teorias mais recentes (KAWAI *et alii*, 1978; BRAMHALL, 1979).

O método comumente usado na determinação de gradientes de umidade é o de fatiamento da amostra em seções cujas umidades são determinadas gravimetricamente (HART e DARWIN JR., 1971; CHOONG *et alii*, 1973 e WILEY e CHOONG, 1975). De uma maneira geral, as fâneas têm espessura em torno de 4 mm e, além da perda de umidade no corte, há uma perda média de 1% de umidade entre o corte e pesagem (WILEY e CHOONG, 1975). Outras limitações deste método já tinham sido discutidas por MOSLEMI (1968): além de lento e destrutivo, a necessidade do fatiamento de amostras diferentes nos vários estágios da secagem torna o estudo mais complexo, devido à variabilidade de características entre as amostras. Este autor, procurando desenvolver um método rápido e não destrutivo, não encontrou, no entanto, sensibilidade na determinação dos gradientes por técnicas vibracionais.

### 3.4. Densidade da água adsorvida na madeira

A densidade da substância-madeira (substância da parede celular da madeira) é normalmente determinada através do volume de uma pequena amostra, obtido a partir de um meio de deslocamento. Este estudo, no entanto, tem se mostrado complexo, pois diferentes meios de deslocamento dão diferentes medidas de volume (STAMM, 1964). Isto deve-se ao tamanho molecular do fluido deslocado, sua afinidade à celulose (YANNOS, 1964) e à tendência do fluido tornar-se orientado e compactado dentro da estrutura da celulose devido a forças atrativas (WILFONG, 1966).

Assim, quando um líquido polar e expansivo como a água é usado como meio de deslocamento, o volume específico aparente (recíproco da densidade aparente) da substância-madeira é menor que o valor obtido quando um meio não-expansivo, como o tolueno, é usado. *WILFONG (1966)*, usando água e tolueno como meios de deslocamento, encontrou valores médios para a densidade da substância-madeira de  $1,525 \text{ g/cm}^3$  e  $1,451 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente. O mesmo autor não observou diferenças significativas entre as densidades obtidas usando-se hélio e tolueno.

Segundo *SIAU (1970)*, o valor obtido com deslocamento de hélio é provavelmente o mais exato, já que, além deste penetrar mais que o tolueno nas cavidades microscópicas da parede celular, não expande a madeira e não é adsorvido pela celulose.

Da diferença entre os volumes específicos da substância-madeira, obtidos por deslocamentos em hélio e água, pode-se estimar a densidade da água adsorvida na parede celular. Esta densidade pode ser considerada como média, já que toda água adsorvida não pode ser comprimida com a mesma intensidade, desde que a energia envolvida durante a adsorção dos primeiros incrementos de água é consideravelmente maior que a envolvida na adsorção dos últimos incrementos (*STAMM, 1964*).

A densidade da água adsorvida é função da umidade da madeira e esta dependência já tinha sido descrita por *MacLEAN (1952)*, como ilustrado na Figura 1.

Os altos valores encontrados na literatura para a densidade da água adsorvida foram atribuídos por *GORING (1966)* a uma perturbação da estrutura da água na parede celular, comparada com a água líquida sob

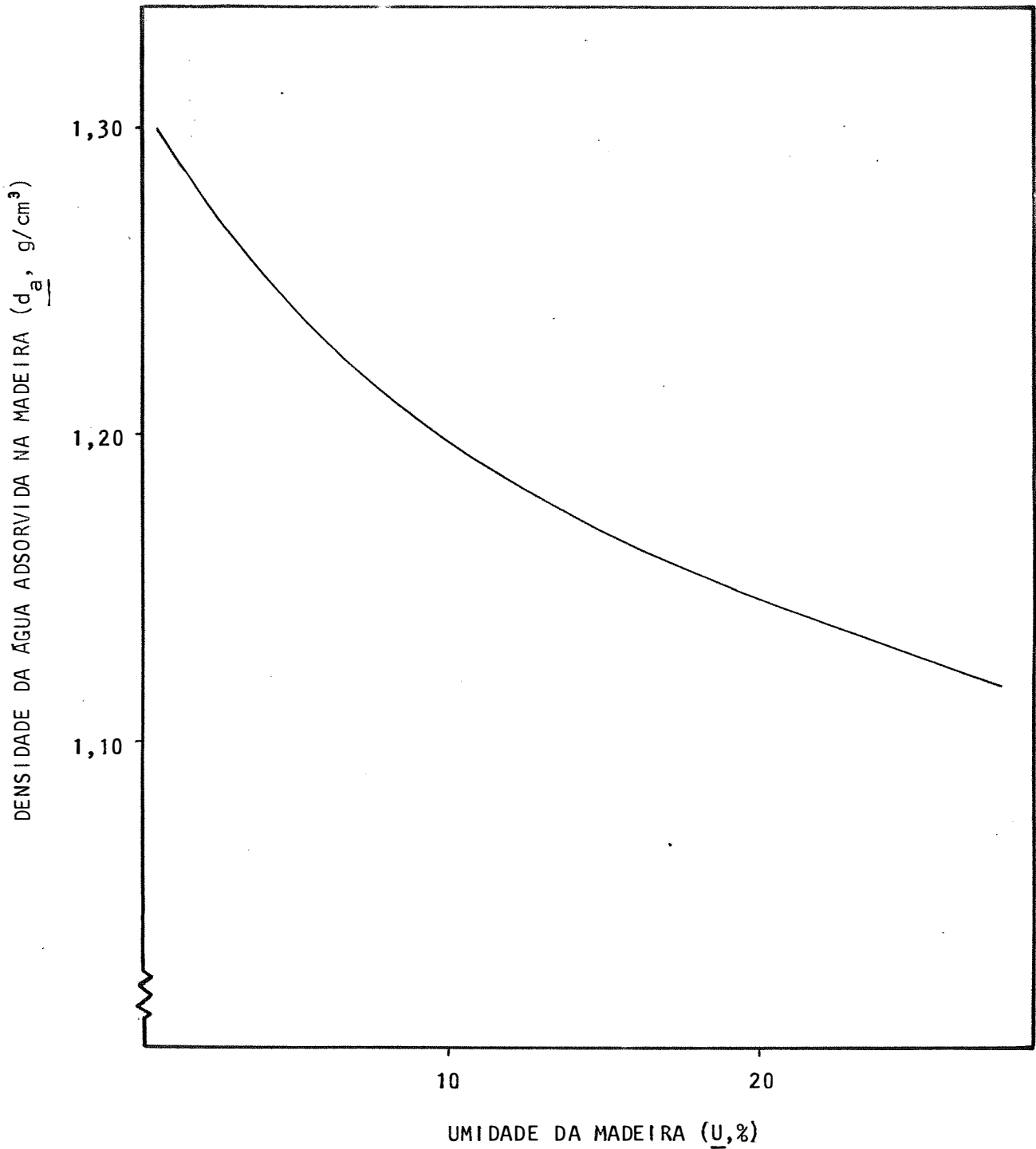


Figura 1 - Densidade da água adsorvida na madeira ( $d_a$ , g/cm<sup>3</sup>) em função da umidade da madeira ( $U$ ,%) - (MacLEAN, 1952)

condições normais. Segundo *WANGAARD (1969)*, esta aparente compressão da água está superestimada, pois estes valores não levam em conta a presença de cavidades microscópicas na parede celular, penetradas pela água, mas não por meios não-expansivos como o hélio. *WEATHERWAX e TARKOW (1968)* verificaram que cerca de 85% da diferença entre os volumes específicos da substância-madeira obtidos usando-se água e hélio é decorrente da menor acessibilidade do hélio às cavidades microscópicas, enquanto que cerca de 15% é causado pela compressão da água adsorvida. Levando-se em conta este fato, o valor encontrado por eles para a densidade da água adsorvida no ponto de saturação de fibra foi  $1,017 \text{ g/cm}^3$ , menor que o valor anteriormente apresentado por *MacLEAN (1952)*,  $1,115 \text{ g/cm}^3$ . Segundo *SKAAR (1972)*, o valor  $1,017 \text{ g/cm}^3$  parece ter uma base teórica mais favorável desde que foi determinado levando-se em conta o volume das cavidades microscópicas.

---

## 4. TEORIA

---

### 4.1. Propriedades físicas da madeira

São consideradas propriedades físicas da madeira aquelas propriedades que envolvem a relação massa-volume e suas variações. Dentre estas propriedades assumem importância destacada a umidade, densidade e porosidade.

A umidade  $U$  é comumente expressa em termos da massa de madeira seca (SKAAR, 1972), como se segue:

$$U = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100 \quad \dots\dots\dots (1)$$

sendo  $m$  a massa total do sistema (madeira + água + ar) e  $m_s$  a massa de maadeira seca.

A umidade da madeira, abaixo da qual toda água presente en

contra-se adsorvida nas paredes celulares, é denominada ponto de saturação de fibra da madeira ( $U_f$ ) e é de grande interesse tecnológico, pois corresponde a um ponto de transição de inúmeras propriedades da madeira (STAMM, 1971). Segundo SIAU (1970), este ponto assume um valor próximo de 30%, para a maioria das espécies de madeira. Acima deste ponto,  $U > U_f$ , a madeira, além de água adsorvida, possui certa quantidade ( $U - U_f$ ) de água livre, ou seja, água contida nas cavidades celulares e no interior dos vasos e traqueídes. Para SKAAR (1972), este termo "água livre" é, no entanto, errôneo, pois esta água, apesar de não estar adsorvida nas paredes celulares, encontra-se sujeita a forças de capilaridade.

A densidade foi, dentre as propriedades físicas da madeira, a primeira a ser estudada (KOLLMANN e CÔTÈ JR., 1968). Apesar de, em termos físicos, ser normalmente baseada em massa e volume, ambos ao mesmo teor de umidade, em pesquisa e tecnologia de madeira tem sido apresentada sob as mais diversas formas, entre as quais destacam-se as que se seguem:

a) densidade da substância-madeira ( $\rho_m$ )

$$\rho_m = \frac{m_s}{V_s} \dots\dots\dots (2)$$

sendo:  $m_s$  a massa da madeira seca

$V_s$  o respectivo volume medido por deslocamento de fluido.

b) densidade aparente da madeira ( $d_m$ )

$$d_m = \frac{m_s}{V_u} \dots\dots\dots (3)$$



sendo:  $V_u$  o volume do sistema (madeira + água + ar) a um dado teor de umidade.

c) densidade básica da madeira ( $d_b$ )

$$d_b = \frac{m_s}{V_v} \dots\dots\dots (4)$$

sendo:  $V_v$  o volume da madeira saturada em água.

Já a porosidade ( $V$ ) da madeira é definida como a fração volumétrica de vazios da madeira (STAMM, 1964) e pode ser determinada a partir das frações volumétricas de substância-madeira e água.

$$V = 1 - (\theta_m + \theta_w) \dots\dots\dots (5)$$

sendo:  $\theta_m$  = fração volumétrica de substância-madeira (volume de substância madeira pelo volume total do sistema)

$\theta_w$  = fração volumétrica de água (volume de água pelo volume total do sistema).

Como já discutido, dependendo de sua umidade, a madeira pode conter, ou só água adsorvida (quando  $U \leq U_f$ ) ou água adsorvida e água livre (quando  $U > U_f$ ). Assim:

$$\theta_w = \theta_a \quad \text{quando } U \leq U_f \dots\dots\dots (6)$$

ou

$$\theta_w = \theta_a + \theta_l \quad \text{quando } U > U_f \quad \dots\dots\dots (7)$$

onde:  $\theta_a$  = fração volumétrica de água adsorvida (volume de água adsorvida pelo volume total do sistema) e

$\theta_l$  = fração volumétrica de água livre (volume de água livre pelo volume total do sistema).

As frações volumétricas podem, por sua vez, serem expressas através das relações seguintes (KOLLMANN e CÔTÉ JR., 1968):

$$\theta_m = \frac{d_m}{\rho_m} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\theta_a = \frac{U}{100} \frac{d_m}{d_a} \quad (U < U_f) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\theta_l = \frac{U_l}{100} \frac{d_m}{\rho_w} \quad \dots\dots\dots (10)$$

onde:  $d_a$  = densidade da água adsorvida à umidade  $U < U_f$

$U_l$  = teor de água livre ( $U - U_f$ )

$\rho_w$  = densidade da água livre.

Forçoso se torna lembrar que, para  $U \geq U_f$ , tem-se

$$\theta_a = \frac{U_f}{100} \frac{d_m}{d_{af}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

sendo:  $d_{af}$  = densidade da água adsorvida na madeira, correspondente ao ponto de saturação de fibra,  $U_f$ .

#### 4.2. Atenuação de um feixe monoenergético de radiação $\gamma$ numa amostra de madeira

A lei de Beer que descreve a atenuação de um feixe monoenergético de radiação  $\gamma$  por um meio, é a que se segue:

$$I = I_{\infty} e^{-\mu\rho x} \dots\dots\dots (12)$$

sendo:  $I$  e  $I_{\infty}$  = as intensidades dos feixes emergente e incidente;  
 $\rho$  e  $x$  = as densidade e espessura do meio absorvedor, e  
 $\mu$  = o coeficiente de atenuação de massa do meio absorvedor que depende da energia da radiação e da geometria utilizada.

Uma amostra de madeira, devido à sua porosidade, normalmente apresenta, além de substância-madeira propriamente dita, certa quantidade de água e ar. Assim sendo, quando se estuda a atenuação de um feixe monoenergético pela madeira, é importante considerar a interação da radiação com cada um destes constituintes.

Isto pode ser conseguido a partir da equação (13), baseada no modelo simplificado, ilustrado na Figura 2.

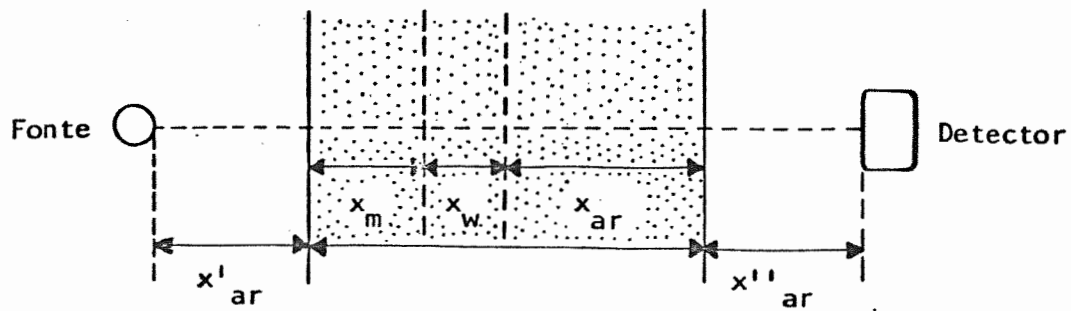


Figura 2 - Modelo simplificado da atenuação de um fóton numa amostra de ma deira

$$I = I_{\infty} \exp - \left[ \mu_m \rho_m x_m + \mu_w \rho_w x_w + \mu_{ar} \rho_{ar} x_{ar} + \mu_{ar} \rho_{ar} (x'_{ar} + x''_{ar}) \right] \dots (13)$$

sendo:  $\mu_m$ ,  $\mu_w$  e  $\mu_{ar}$  = os coeficientes de atenuação de massa da substância-madeira, água e ar, respectivamente;

$\rho_m$ ,  $\rho_w$  e  $\rho_{ar}$  = as densidades da substância-madeira e da água e ar sob condições normais de temperatura e pressão, respectivamente;

$x_m$ ,  $x_w$  e  $x_{ar}$  = as espessuras da substância-madeira, água e ar, respectivamente, tal que,  $x_m + x_w + x_{ar} = x$  (espessura total da amostra);

$x'_{ar}$  e  $x''_{ar}$  = as espessuras das camadas de ar entre fonte a amostra e amostra e detector, respectivamente.

Quando se usa sempre a mesma geometria, a última parcela dentro da exponencial da equação (13) manifesta-se constante, podendo ser conhecida a fração constante atenuada ( $I_0$ ) pelos absorvedores constantes da geometria. Assim, a atenuação de um feixe entre a fonte e o detector,

na ausência da amostra, é dada por:

$$I_0 = I_\infty \exp - \left[ \mu_{ar} \rho_{ar} (x'_{ar} + x''_{ar} + x) \right] \dots\dots\dots (14)$$

Logo, a atenuação pela amostra pode ser descrita de forma simplificada, dividindo-se (13) por (14), donde se obtém:

$$I = I_0 \exp - \left[ \mu_m \rho_m x_m + \mu_w \rho_w x_w + \mu_{ar} \rho_{ar} (x_{ar} - x) \right] \dots\dots\dots (15)$$

Se a secção reta da amostra, perpendicular ao feixe, é constante e de área A, pode-se expressar as espessuras da amostra (x), de substância-madeira (x<sub>m</sub>), de água (x<sub>w</sub>) e de ar (x<sub>ar</sub>) em função dos respectivos volumes V<sub>t</sub>, V<sub>m</sub>, V<sub>w</sub> e V<sub>ar</sub>. Assim:

$$x = \frac{V_t}{A} \dots\dots\dots (16)$$

$$x_m = \frac{V_m}{A} \dots\dots\dots (17)$$

$$x_w = \frac{V_w}{A} \dots\dots\dots (18)$$

$$x_{ar} = \frac{V_{ar}}{A} \dots\dots\dots (19)$$

Dividindo-se (17), (18) e (19) por (16), obtêm-se as espessuras em função dos respectivos volumes fracionais.

$$x_m = x \theta_m \dots\dots\dots (20)$$

$$x_w = x \theta_w \dots\dots\dots (21)$$

$$x_{ar} = x \theta_{ar} \dots\dots\dots (22)$$

Substituindo-se (20), (21) e (22) em (15), tem-se:

$$I = I_0 \exp - \left[ \mu_m \rho_m x \theta_m + \mu_w \rho_w x \theta_w + \mu_{ar} \rho_{ar} x (\theta_{ar} - 1) \right] \dots\dots\dots (23)$$

Como  $\mu_{ar} \approx 0,03 \text{ cm}^2/\text{g}$ , para energia de 60 keV ( $^{241}\text{Am}$ ), e  $\rho_{ar} \approx 1,2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$  nas CNTP, a última parcela dentro da exponencial da equação (23) é cerca de  $10^3$  a  $10^4$  vezes menor que as outras parcelas. Assim, desprezando-a e considerando  $\rho_w = 1,0 \text{ g/cm}^3$ , fica:

$$I = I_0 \exp - \left[ x (\mu_m \rho_m \theta_m + \mu_w \theta_w) \right] \dots\dots\dots (24)$$

A partir da equação (24) pode-se, então, determinar a umidade da madeira. No entanto, tem-se dois casos a considerar:

19) Umidade igual ou inferior ao ponto de saturação de fibra ( $U \leq U_f$ )

Desde que, neste caso, não há água livre na madeira,  $\Theta_w = \Theta_a$  e, levando-se em conta as equações (8) e (9), pode-se escrever:

$$I = I_o \exp - \left[ x (\mu_m d_m + \mu_w \frac{U}{100} \frac{d_m}{d_a}) \right] \dots\dots\dots (25)$$

Assim:

$$U = \left[ \frac{\ln (I_o/I)}{x d_m} - \mu_m \right] \frac{100 d_a}{\mu_w} \dots\dots\dots (26)$$

Como discutido em 3.4., a densidade da água adsorvida na madeira ( $d_a$ ) é função da umidade (U).

Assim, para que a equação (26) possa ser utilizada na determinação de umidade abaixo do ponto de saturação de fibra, torna-se necessário conhecer, "a priori" esta dependência  $d_a = d_a(U)$ .

Caso se conheça a umidade U, a densidade da água adsorvida pode, por sua vez, ser determinada, explicitando-se  $d_a$  da equação (26), obtendo-se a equação (27):

$$d_a = \frac{\frac{U}{100} \mu_w}{\frac{\ln (I_o/I)}{x d_m} - \mu_m} \dots\dots\dots (27)$$

29) Umidade superior ao ponto de saturação de fibra ( $U > U_f$ )

Neste caso,

$$\theta_w = \frac{U_f}{100} \frac{d_m}{d_{af}} + \frac{(U - U_f)}{100} \frac{d_m}{\rho_w} \dots\dots\dots (28)$$

já que, além de umidade correspondente ao ponto de saturação de fibra, tem-se água livre no sistema. Substituindo-se (8) e (28) em (24), tem-se:

$$I = I_o \exp - x \left\{ \mu_m d_m + \mu_w \left[ \frac{U_f}{100} \frac{d_m}{d_{af}} + \frac{(U - U_f)}{100} d_m \right] \right\} \dots\dots (29)$$

Assim, pode-se escrever

$$I = I_o \exp - x \left\{ \mu_m d_m + \mu_w \frac{d_m}{100} \left[ U_f \left( \frac{1}{d_{af}} - 1 \right) + U \right] \right\} \dots\dots (30)$$

A umidade será dada, então, por

$$U = \left[ \frac{\ln (I_o/I)}{x d_m} - \mu_m \right] \frac{100}{\mu_w} - U_f \left( \frac{1}{d_{af}} - 1 \right) \dots (31)$$



### 4.3. Erros na determinação de umidade

Já que a determinação de umidade de madeira por atenuação de radiação  $\gamma$  envolve medidas de várias grandezas, como ilustrado nas equações (26) e (31), a exatidão deste método (método  $\gamma$ ) fica limitada pelos erros destas medidas.

Seja a função  $v = f(x, y, z)$ . Se os erros absolutos máximos  $|\Delta^*x|$ ,  $|\Delta^*y|$  e  $|\Delta^*z|$  correspondentes às medidas de  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente, forem suficientemente pequenos, pode-se determinar o erro absoluto máximo na determinação de  $v$ , como se segue (PISKUNOV, 1955):

$$|\Delta^*v| = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| |\Delta^*x| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| |\Delta^*y| + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| |\Delta^*z| \dots\dots (32)$$

O erro relativo máximo,  $|\delta^*v| = |\Delta^*v| / |v|$ , será dado por

$$|\delta^*v| = \left| \Delta^* \ln |f| \right| \dots\dots\dots (33)$$

Assim, o erro na determinação de umidade pode ser obtido através das derivadas parciais das funções descritas em (26) e (31), uma vez conhecidos os erros absolutos máximos das medidas efetuadas. Para  $U < U_f$ , por exemplo, como  $U = f(A, x, d_m, d_a, \mu_m, \mu_w)$ , onde  $A = \ln(I_0/I)$ , tem-se:

$$|\Delta^*U| = \left| \frac{\partial f}{\partial A} \right| |\Delta^*A| + \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| |\Delta^*x| + \left| \frac{\partial f}{\partial (d_m)} \right| |\Delta^*d_m| + \left| \frac{\partial f}{\partial (d_a)} \right| |\Delta^*d_a| +$$

$$+ \left| \frac{\partial f}{\partial \mu_m} \right| |\Delta^* \mu_m| + \left| \frac{\partial f}{\partial \mu_w} \right| |\Delta^* \mu_w| \dots \dots \dots (34)$$

sendo que:

$$\frac{\partial f}{\partial A} = \frac{100 d_a}{x d_m \mu_w} \dots \dots \dots (35)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = - \frac{100 A d_a}{x^2 d_m \mu_w} \dots \dots \dots (36)$$

$$\frac{\partial f}{\partial (d_m)} = - \frac{100 A d_a}{x d_m^2 \mu_w} \dots \dots \dots (37)$$

$$\frac{\partial f}{\partial (d_a)} = \left( \frac{A}{x d_m} - \mu_m \right) \frac{100}{\mu_w} \dots \dots \dots (38)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \mu_w} = - \left( \frac{A}{x d_m} - \mu_m \right) \frac{100 d_a}{\mu_w^2} \dots \dots \dots (39)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \mu_m} = - \frac{100 d_a}{\mu_w} \dots \dots \dots (40)$$

FERRAZ e MANSELL (1979), estudando os erros envolvidos na determinação de densidade e umidade de solos por atenuação de radiação  $\gamma$ , ressaltam que a exatidão do método utilizado é limitada predominantemente

pelos erros advindos das medidas de  $I_0$  e  $I$  em decorrência da aleatoriedade da desintegração radioativa.

Assim, sob condições ótimas de medidas, quando os erros devidos às medidas das demais grandezas são desprezíveis, pode-se escrever:

$$dU = \frac{\partial f}{\partial A} dA \dots\dots\dots (41)$$

Diferenciando-se a equação (25), tem-se:

$$\frac{dI}{dU} = \left[ I_0 \exp - x \left( \mu_m d_m + \mu_w \frac{U d_m}{100 d_a} \right) \right] \left( \frac{-x \mu_w d_m}{100 d_a} \right) \dots\dots\dots (42)$$

ou

$$\frac{dI}{dU} = - I \times \frac{\mu_w d_m}{100 d_a} \dots\dots\dots (43)$$

Segundo *WANG et alii (1975)*, se a estabilidade do equipamento de detecção é boa, o erro  $dI/I$  pode ser atribuído unicamente à aleatoriedade da desintegração radioativa e ser considerado igual a  $1/\sqrt{I}$ . Assim:

$$\frac{1}{\sqrt{I}} = \frac{- x \mu_w d_m}{100 d_a} dU \dots\dots\dots (44)$$

Os erros absoluto e relativo da medida de umidade pelo método do  $\gamma$  podem, então, ser expressos como se segue:

$$|dU| = \frac{100 d_a}{x d_m \mu_w \sqrt{I_o}} \exp \left[ \frac{x d_m}{2} \left( \mu_m + \frac{U \mu_w}{100 d_a} \right) \right] \dots\dots\dots (45)$$

$$|\delta U| = \frac{100 d_a}{x d_m \mu_w \sqrt{I_o} U} \exp \left[ \frac{x d_m}{2} \left( \mu_m + \frac{U \mu_w}{100 d_a} \right) \right] \dots\dots\dots (46)$$

A exatidão do método pode ser, no entanto, melhorada trabalhando-se com amostras cujas espessuras sejam próximas da espessura ideal de trabalho,  $x^*$ , que é o valor de  $x$  que satisfaz a relação

$$\frac{d |\delta U|}{dx} = 0 \dots\dots\dots (47)$$

Assim, para  $U < U_f$ ,

$$x^* = \frac{2}{d_m \left( \mu_m + \frac{U \mu_w}{100 d_a} \right)} \dots\dots\dots (48)$$

Analogamente, quando  $U > U_f$ , as expressões para o erro relativo e espessura ideal são:

$$|\delta U| = \frac{100 \exp \frac{x d_m}{2} \left\{ \mu_m + \frac{\mu_w}{100} \left[ U_f \left( \frac{1}{d_{af}} - 1 \right) + U \right] \right\}}{x d_m \mu_w U \sqrt{I_0}} \dots\dots\dots (49)$$

$$x^* = \frac{2}{d_m \left\{ \mu_m + \frac{\mu_w}{100} \left[ U_f \left( \frac{1}{d_{af}} - 1 \right) + U \right] \right\}} \dots\dots\dots (50)$$

A Figura 3 ilustra o erro relativo teórico na determinação de umidade em função da umidade da madeira.

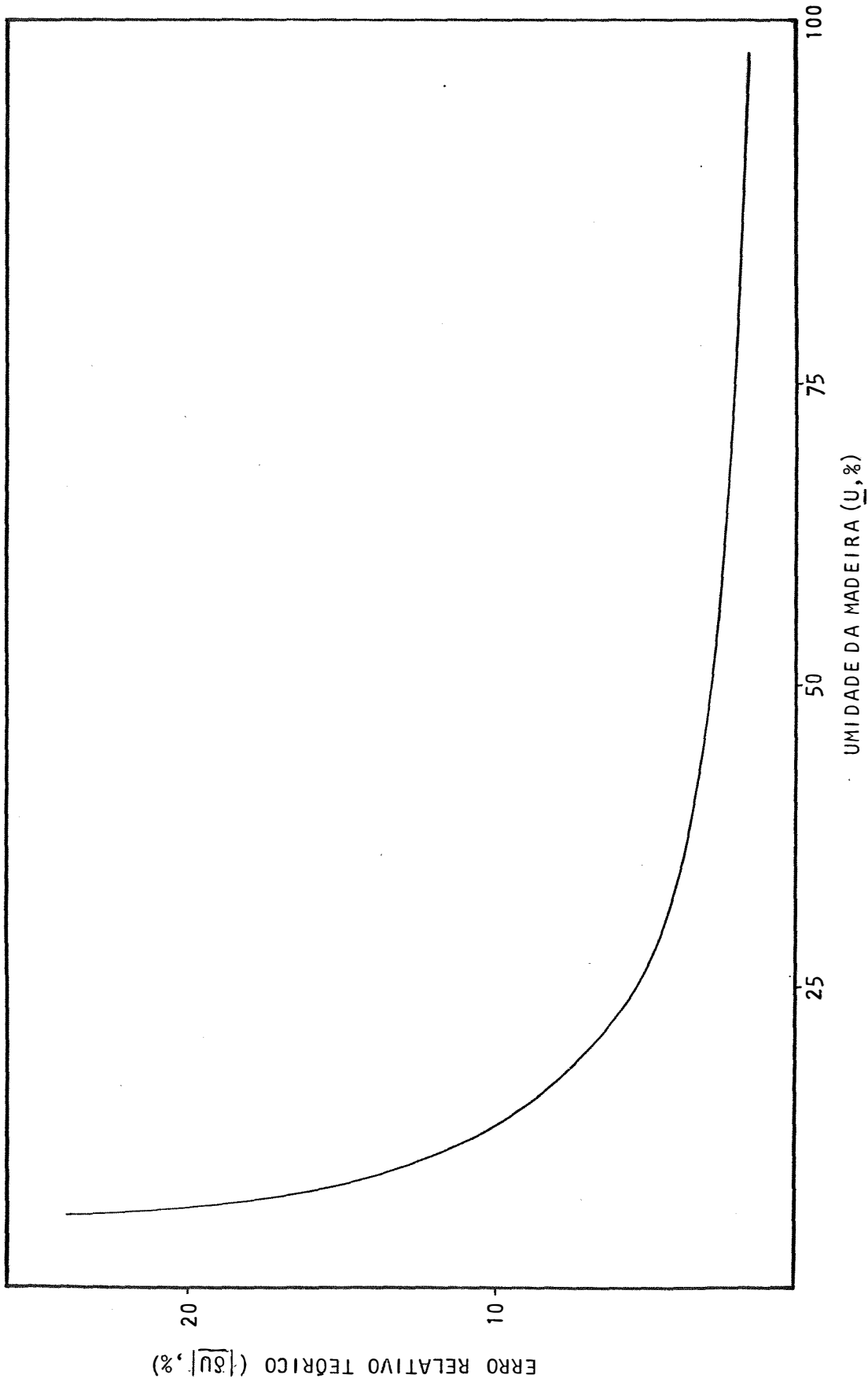


Figura 3 - Erro relativo teórico ( $|\delta U|, \%$ ) da medida de unidade pelo método gama, em função da unidade da madeira ( $U, \%$ )

---

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

---

Procurou-se inicialmente montar um sistema de colimação e detecção de radiação que possibilitasse a otimização das condições de medida, compatibilizando precisão, sensibilidade, rapidez e fácil manuseio da amostra. Já que para a determinação de umidade de madeira por atenuação de radiação  $\gamma$  deve-se conhecer "a priori" os coeficientes de atenuação de massa da madeira e água, o ponto de saturação de fibra da madeira e o relacionamento entre a densidade da água adsorvida e a umidade da madeira, determinou-se estes parâmetros procedendo-se, em seguida, ao acompanhamento da evolução dos gradientes de umidade em amostras de Pinus durante seu processo de secagem numa câmara cujas condições de temperatura e umidade relativa foram controladas.

## 5.1. Instrumental de detecção de radiação $\gamma$

### 5.1.1. Geometria e equipamento

Para a detecção de radiação  $\gamma$  foi montada geometria linear com boa colimação, tanto na fonte radioativa como no detector de cristal, tendo os colimadores circulares diâmetro de 0,004 m. Entre a fonte e o detector, montados sobre um plano de nível e distanciados de 0,120 m, foi instalado um trilho onde, através de dois posicionadores X e Y, as amostras podiam ser deslocadas horizontal ou verticalmente. A Figura 4 ilustra a geometria utilizada.

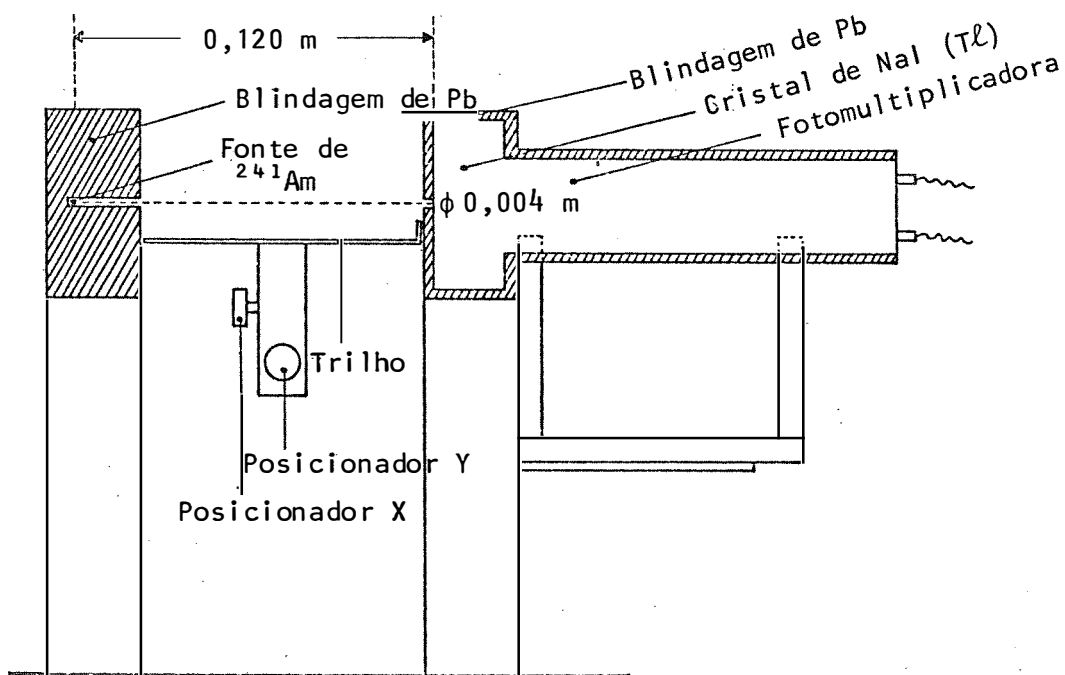


Figura 4 - Esquema da geometria utilizada na atenuação de radiação  $\gamma$  por a mostras de madeira



A fonte radioativa utilizada foi  $^{241}\text{Am}$  que decai por emissão de partícula alfa com uma meia-vida de 458 anos. Associadas com a emissão de partícula alfa, tem-se subseqüentes emissões de fótons, dentre os quais os mais abundantes têm energia de 59,6 keV; 26,4 keV e 33,2 keV e intensidades relativas respectivamente 35,9%, 2,5% e 0,17% (MAGNUSSON, 1957).

Segundo MILLER (1955), a alta meia-vida e a baixa energia de pico de radiação gama tornam o  $^{241}\text{Am}$  adequado para ser utilizado em métodos absorciométricos. Outras vantagens do uso de radiação gama de baixa energia em relação à radiação gama de alta energia em estudos de relação água-meio poroso, são citadas por GARDNER e CALLISENDORF (1967): o menor valor requerido para a espessura ótima da amostra e o menor peso de blindagem necessária para colimação e proteção do operador.

As características principais da fonte de  $^{241}\text{Am}$  utilizada neste trabalho são:

Energia do gama ..... 59,6 keV

Atividade atual ..... 100 mCi

Para a detecção e contagem da radiação gama o equipamento utilizado foi constituído de:

Detector de NaI (Tl) de (2 x 1/4)'', acoplado à fotomultiplicadora

(Harshaw, modelo 4D4-F6)

Fonte de voltagem (Ortec, modelo 452)

Pré-amplificador (Hewlet-Packard, modelo 5554A)

Amplificador (Ortec, modelo 472A)

Escalarímetro/temporizador (Ortec, modelo 719)

Analizador monocanal (Ortec, modelo 550)

"Scaler" (Ortec, modelo 430)

Osciloscópio (Tektronix, modelo 515A).

### 5.1.2. Detecção e contagens

Em estudos em que se utiliza a atenuação de radiação gama por um sistema, além de grandes distâncias de colimação, pequenos ângulos de dispersão e feixe o mais estreito possível, faz-se necessário também trabalhar-se com altas taxas de contagens, para se ter uma estatística razoável (FERRAZ, 1975). Segundo WATT e LAWTHER (1958), incertezas nas medidas de  $dI/I$  são causadas por flutuações devido à aleatoriedade da desintegração da fonte radioativa e por limitações na estabilidade e precisão do equipamento de detecção de radiação. Assim, a largura adotada para a janela de contagem deve ser tal que eventuais deslocamentos da posição do pico devido à instabilidade do equipamento de detecção cause uma variação mínima na taxa de contagem (GROENEVELT *et alii*, 1969).

Tendo em vista estes aspectos e, após obtido o espectro do  $^{241}\text{Am}$ , ilustrado na Figura 5, utilizando-se a geometria descrita em 5.1.1., foi escolhida a largura da janela do contador que seria adotada nos estudos posteriores (32 keV), sendo os discriminadores inferior e superior fixos em 43 keV e 75 keV, respectivamente.

Assim, o desvio teórico das medidas efetuadas de  $I$  pode ser considerado devido unicamente à desintegração radioativa e igual a  $\sqrt{I}$ , ao nível de 68,3% de probabilidade (WANG *et alii*, 1975).

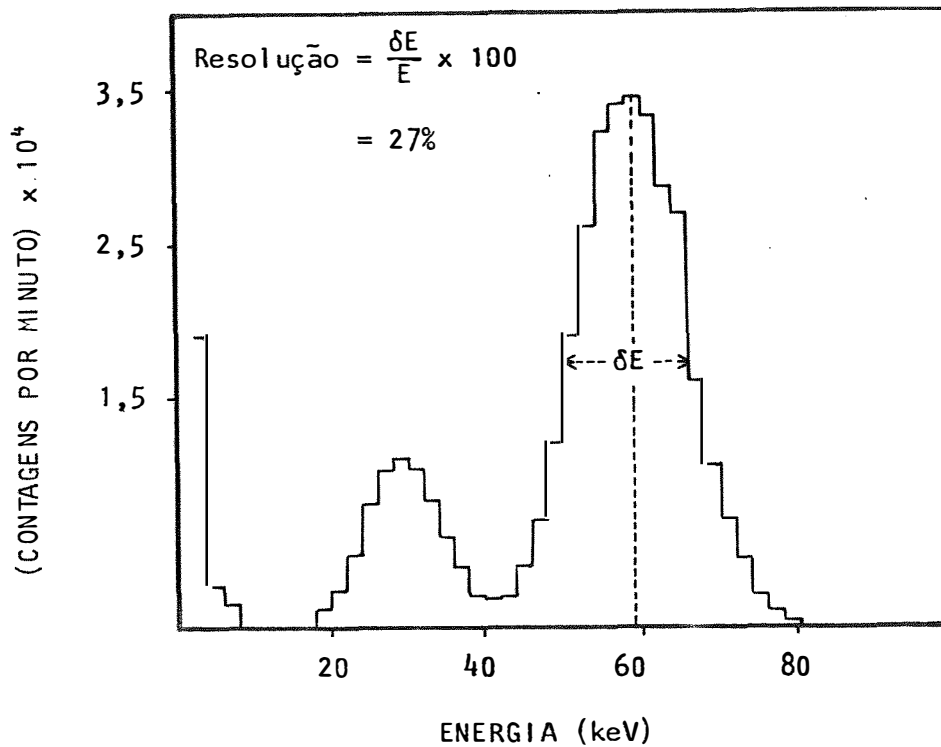


Figura 5 - Espectro do  $^{241}\text{Am}$  obtido com sistema de boa colimação e janela de 2 keV

Com a geometria descrita em 5.1.1. e adotada a largura da janela de 32 keV, obteve-se taxas de contagens das ordens de 100000 cpm e 210000 cpm, com e sem absorvedor, respectivamente. Todas as taxas de contagens obtidas foram, então, corrigidas, já que, nestes casos, o número de eventos registrados no contador é inferior ao número de fótons que atingem o detector.

Esta diferença se manifesta devido ao tempo morto ( $\tau_e$ ) e tempo de resolução ( $\tau_s$ ) do sistema eletrônico. Quando a taxa de eventos é muito grande, parte dos pulsos não é contada devido ao tempo de inoperância do sistema eletrônico ( $\tau_e$ ). Por outro lado, há a probabilidade que

depende do tempo de resolução ( $\tau_s$ ), que dois ou mais pulsos coincidentes no tempo resultem um pulso de grande amplitude que não é contado, devido ao ajuste do discriminador superior.

A equação abaixo (FERRAZ, 1975) ilustra o relacionamento entre a taxa de contagens registrada no contador (I) e a taxa de pulsos originada no detector (I').  $N_1$  e  $N_2$  são, respectivamente, as taxas de pulsos que saem do detector e discriminador inferior.

$$I = I' \left[ 1 - \tau_e N_2 - \tau_s \frac{(I' + N_1)}{2} \right] \dots\dots\dots (51)$$

A correção da taxa de contagens é comumente feita, no entanto, através de uma equação simplificada de (51), supondo-se

$$N_2 \approx I$$

$$I' + N_1 \approx 2I \quad e$$

$$\tau = \tau_e + \tau_s$$

Assim, tem-se:

$$I' = \frac{I}{(1 - \tau I)} \dots\dots\dots (52)$$

Neste trabalho, todas as taxas de contagens foram corrigidas de acordo com a equação (52). O valor de  $\tau$  considerado ( $5 \times 10^{-6}$  s) foi determinado experimentalmente segundo o método descrito por GARDNER

*et alii* (1972). Não foi feita, no entanto, correção devido à radiação de fundo, pois esta mostrou-se, no decorrer do experimento, ser sempre bem inferior a 1% das taxas de contagens obtidas.

## 5.2. Densidade da água adsorvida

### 5.2.1. Material

Na condução deste experimento, foram utilizadas quatro amostras de Pinus (*Pinus oocarpa*), quatro de Cedro (*Cedrela fissilis*) e quatro de Marfim (*Balfourodendron riodelianum*). A escolha dessas espécies baseou-se no fato de, além de serem amplamente utilizadas em carpintaria e marcenaria, apresentarem um grande intervalo de variação de densidade média.

No desenvolvimento do trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos:

moinho Wiley, com peneira de 10 "mesh"

prensa hidráulica de laboratório Carver (0 a 1150 kg/cm<sup>2</sup>)

paquímetro Mitutoyo, com precisão de 0,002 cm

estufa a  $(105 \pm 3)^{\circ}\text{C}$

sistema de detecção de radiação gama, descrito no item 5.1.

balança Mettler (P163), com precisão de 0,001 g

sistema de saturação por vácuo intermitente

climatizador, com controle de temperatura e umidade relativa

(Modelo VP-1000 AT, fabricado pela Blue-M Company)

### 5.2.2. Coeficientes de atenuação de massa

O coeficiente de atenuação de massa de um sistema ( $\mu$ ) é obtido a partir da lei de Beer-Lambert (12):

$$\mu = \ln \frac{(I_0/I)}{\rho x} \dots\dots\dots (12)$$

A fim de melhorar a precisão na determinação experimental de  $\mu$ , é conveniente que as medidas sejam feitas dentro de um certo intervalo de variação de  $\rho$  e/ou  $x$  (FERRAZ, 1974).

Assim, para a determinação experimental do coeficiente de atenuação de massa de cada espécie de madeira estudada ( $\mu_m$ ), optou-se por trabalhar com serragem. Amostras de cada espécie foram inicialmente transformadas em serragem de fração 10 (fração da serragem que atravessa uma peneira de 10 "mesh"). Esta serragem, após seca em estufa a  $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$ , foi compactada em 3 cilindros de dimensões diferentes e exposta à incidência de radiação gama, obtendo-se assim  $I$  (intensidade do feixe emergente). Em seguida a cada determinação de  $I$ , obteve-se  $I_0$  (intensidade do feixe incidente). Este procedimento foi repetido com 5 compactações diferentes, obtendo-se, assim, 15 pares  $(\rho, x)$  e os correspondentes pares  $(I_0, I)$ . As determinações de  $I_0$  e  $I$  foram feitas por 4 minutos e os valores obtidos corrigidos de acordo com a equação (52). Finalmente, após obtidos os 15 valores de  $\mu_m$  pela lei de Beer-Lambert, determinou-se o valor médio para cada espécie, assim como o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Para a determinação do valor do coeficiente da água ( $\mu_w$ ), foram preparados recipientes de acrílico de diferentes dimensões. Estes

recipientes, quando vazios, foram expostos à incidência da radiação gama, determinando-se, assim,  $I_0$ . Enchendo-se estes recipientes com água destilada a 25°C e, fixadas as mesmas dimensões ao longo do feixe de radiação, determinou-se os correspondentes valores de I. Obteve-se, assim, 8 pares ( $I_0, I$ ), valores estes que foram tomados por 4 minutos e corrigidos de acordo com a equação (52). Após os valores de  $\mu_w$  serem determinados, foram obtidos o valor médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

O coeficiente de atenuação de massa de uma mistura pode ser previsto teoricamente, desde que se conheça os coeficientes de atenuação de massa dos seus constituintes. Se cada constituinte tem abundância relativa  $m_i$  e coeficiente de atenuação  $\mu_i$ , o coeficiente de atenuação de massa teórico da mistura será dado por:

$$\mu_t = \sum_{i=1}^n \mu_i m_i \dots\dots\dots (53)$$

sendo

$$\sum_{i=1}^n m_i = 1 \dots\dots\dots (54)$$

Assim, a determinação de  $\mu_t$  pode ser obtida conhecendo-se a constituição química da mistura e os valores teóricos dos  $\mu_i$  correspondentes à energia da radiação considerada. Tendo em vista o exposto, e com os dados acerca da constituição química de *Pinus oocarpa*, apresentados por BARRICHELO (1979a), e os valores teóricos dos  $\mu_i$  dos diversos elementos (FERRAZ, 1974), foram calculados os coeficientes de atenuação de massa

para esta espécie de madeira e para a água. Devido à carência de dados na literatura acerca das constituições químicas das outras espécies utilizadas no presente trabalho (Cedro e Marfim), seus coeficientes de atenuação teóricos não foram determinados.

### 5.2.3. Determinação experimental

De cada uma das espécies citadas no item 5.2.1. foram preparadas 4 amostras de dimensões secas aproximadamente (1,5 x 5,0 x 8,0) cm. Estas dimensões foram escolhidas tendo em vista a boa sensibilidade do método e que o volume total das 12 amostras fosse compatível com as dimensões do climatizador, onde seriam condicionadas. As amostras, após permanecerem em água, sob vácuo intermitente, até a completa saturação (BARRICHELO, 1979b), foram mantidas no climatizador para serem condicionadas a diferentes umidades de equilíbrio, de acordo com a sequência e condições apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de temperatura ( $t$ , °C) e umidade relativa (UR, %) nas sucessivas etapas de condicionamento das amostras

| Etapa | Temperatura ( $t$ , °C) | Umidade Relativa (UR,%) |
|-------|-------------------------|-------------------------|
| 1     | 40                      | 95                      |
| 2     | 40                      | 87                      |
| 3     | 40                      | 76                      |
| 4     | 40                      | 53                      |
| 5     | 40                      | 38                      |
| 6     | 40                      | 27                      |



A umidade de equilíbrio em cada condicionamento foi considerada atingida quando, após 3 "pesagens" sucessivas (de 3 h em 3 h) de uma amostra sorteada, a diferença entre 2 dos 3 valores obtidos foi igual ou inferior a 0,02 g (JANKOWSKY, 1979).

Após cada condicionamento, as amostras eram impermeabilizadas com papel aluminizado e, após determinadas suas massas e dimensões, eram expostas ao feixe colimado de radiação gama. Durante o tempo de incidência da radiação foram feitas varreduras vertical e horizontal ao longo da amostra tal que a atenuação final obtida fosse bem representativa da amostra. Para cada amostra foi obtido um par  $(I_0, I)$ , sendo que estes valores foram obtidos por 4 minutos e corrigidos de acordo com a equação (52).

Após a última etapa de condicionamento, as amostras foram secas em estufa a  $(105 \pm 3)^{\circ}\text{C}$  e, a partir das massas secas obtidas, determinou-se a umidade correspondente a cada amostra em cada condicionamento.

Sendo já conhecidos os coeficientes de atenuação de massa da água e madeira (item 5.2.2.), a densidade da água adsorvida na madeira ( $d_a$ ) foi calculada para cada amostra e cada condicionamento, através da equação (27).

$$d_a = \frac{\frac{U}{100} \mu_w}{\frac{\ln (I_0 / I)}{x d_m} - \mu_m} \dots\dots\dots (27)$$

sendo a densidade aparente da madeira ( $d_m$ ) determinada de acordo com a equação (3).

O valor médio das 12 determinações de  $d_a$ , correspondentes a cada condicionamento, foi então obtido e correlacionado com a umidade média de cada condicionamento.

### 5.3. Ponto de saturação de fibra

Com os dados obtidos nos condicionamentos descritos no item 5.2.3., o ponto de saturação de fibra de *Pinus oocarpa* foi determinado, segundo metodologia discutida por STAMM (1971). Segundo este autor, já que a variação dimensional da madeira é desprezível acima do ponto de saturação de fibra, este pode ser determinado pelo intercepto no eixo das abcissas da curva retratibilidade volumétrica porcentual da madeira versus sua umidade.

A retratibilidade volumétrica porcentual é determinada através da seguinte relação:

$$R_V = \frac{\text{volume da amostra saturada} - \text{volume da amostra à umidade } U}{\text{volume da amostra saturada}} \quad (55)$$

Assim, correspondente a cada etapa de condicionamento, obtve-se os valores de  $R_V$  para cada uma das 4 amostras. O valor médio de  $R_V$  foi, então, obtido e correlacionado com a umidade média de cada condicionamento.

## 5.4. Gradientes de umidade na madeira durante sua secagem

### 5.4.1. Preparação da câmara

Por ser este um trabalho metodológico, procurou-se trabalhar com o mínimo possível de variáveis. Assim, foi conveniente que as amostras permanecessem durante todo o período de estudo em ambiente com temperatura e umidade relativa constantes, em local onde pudesse ser instalado também todo o equipamento de medida. Assim procedendo, evitou-se que as amostras, durante o tempo de medida, sofressem variações de umidade e dimensões, decorrentes de mudanças ambientais.

Optou-se, então, pela utilização de uma câmara PERCIVAL (Boone Yowa) de dimensões (2,25 x 1,35 x 2,00)m. Através de seus controles externos, a temperatura ambiental foi ajustada para 25°C, valor este que apresentou pequena flutuação (1°C) durante o dia e noite, após 14 dias do ajuste. Já o ajuste da umidade relativa (50%) levou mais tempo (cerca de 40 dias), após o qual a variação máxima da umidade relativa observada durante o dia e noite foi de 5%. Esta boa uniformização foi obtida com a instalação, dentro da câmara, de um desumidificador OASIS, fabricado por EBCO. As medidas de temperatura e umidade relativa com precisões de 1°C e 1%, respectivamente, foram efetuadas com um termohigrógrafo de fabricação KRAKÓW, pré-calibrado.

Os valores de temperatura e umidade relativa foram estabelecidos tendo em vista o grande número de trabalhos na literatura acerca do movimento de água na madeira sob estas condições ambientais e o bom funcionamento do sistema de detecção de radiação gama.

Após a uniformização destas condições, foi instalado dentro da câmara todo o sistema de medida, constituído de:

sistema de detecção de radiação gama, descrito no item 5.1.

balança Mettler (P163), com precisão de 0,001 g

paquímetro Mitutoyo, com precisão de 0,002 cm

termohigrógrafo, de fabricação KRAKÓW, pré-calibrado.

A Figura 6 apresenta uma visão geral do sistema de medida, já instalado dentro da câmara.

#### 5.4.2. Preparação das amostras

Uma tora de *Pinus oocarpa*, proveniente de árvore de 18 anos, de Agudos (SP), após o corte permaneceu ao ar durante uma semana para propiciar perda de resina. Em seguida, foi desdobrada, obtendo-se tábuas do cerne, simétricas em relação à medula. Das tábuas que apresentaram menor número de nós, foram obtidas 5 amostras de dimensões (5 x 7 x 15) cm nas direções tangencial, radial e longitudinal, respectivamente. Após secagem a 50°C (3 dias) e, em seguida 105°C (1 dia), devido aos empenamentos verificados, as amostras tiveram suas dimensões reduzidas para 4 cm, 6 cm e 13 cm. Uma vez aparadas e lixadas, as amostras foram impermeabilizadas em 4 das 6 faces, de tal modo a propiciar posteriormente movimento unidirecional (longitudinal) de umidade. O impermeabilizante utilizado foi uma mistura dos 3 produtos: DMP-30, EPON-812 e EPOXY-HARDENER DDSA, da "Shell Chemical Co." (GALVÃO, 1972).

Uma vez impermeabilizadas, as amostras foram mantidas em água, sob vácuo intermitente (BARRICHELO, 1979b), durante aproximadamente

45 dias, até completa saturação.

Em seguida, foram levadas até a câmara descrita em 5.4.1. e dispostas simetricamente ao sistema de medida nela instalado. A Figura 7 ilustra o posicionamento das amostras na câmara e o termohigrógrafo utilizado nas determinações de temperatura e umidade relativa ambientais durante todo o processo de secagem.

### 5.4.3. Determinação experimental

A determinação da distribuição de umidade em cada uma das 5 amostras, durante sua secagem na câmara, foi feita periodicamente e como descrito a seguir:

- a) A amostra era colocada no trilho ilustrado na Figura 4, tal que o feixe de radiação incidia perpendicularmente à sua direção longitudinal. Uma de suas faces não-impermeabilizadas, previamente escolhida, situava-se a 0,5 cm do feixe.
- b) Era feita contagem, por 12 s, de I (intensidade do feixe emergente). Durante esse tempo de contagem, através do posicionador Y adaptado ao trilho, fazia-se uma varredura vertical a fim de que a contagem obtida fosse representativa deste "plano" da amostra.
- c) O procedimento descrito em b era repetido ao longo da direção longitudinal, de 0,5 em 0,5 cm, totalizando, assim, 25 determinações. O tempo de contagem adotado (12 s) mostrou-se adequado, pois, além de se obter uma contagem relativamente alta (cerca de 20.000), o tempo total gasto nas 25 determinações ao longo de toda amostra, cerca de 6 minutos, era

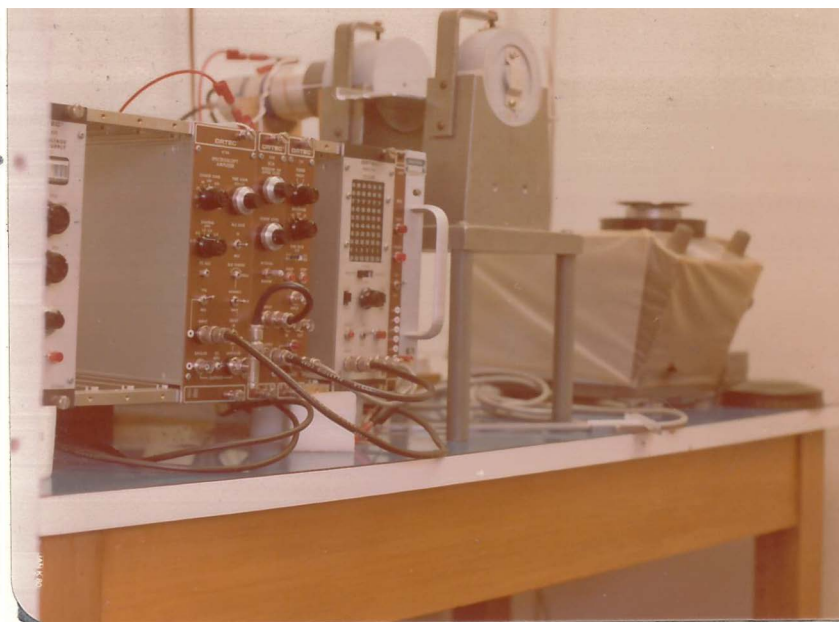


Figura 6 - Sistema de medida utilizado, já instalado dentro da camara

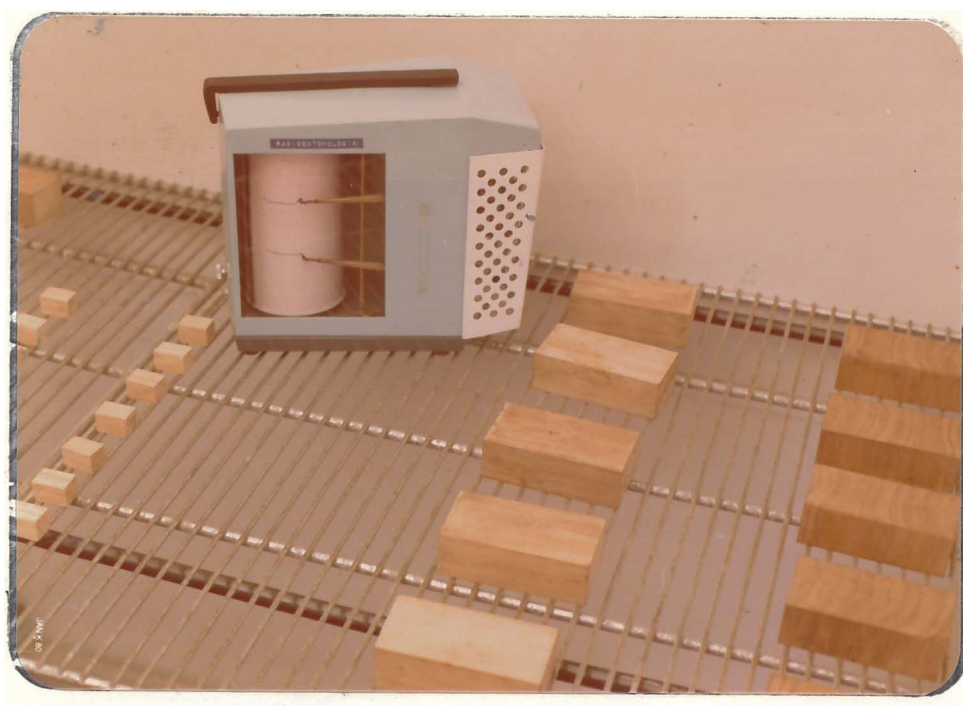


Figura 7 - Visão geral das amostras durante a secagem na camara

pequeno para que houvesse mudança significativa na distribuição de umidade na amostra.

- d) Em seguida, a massa da amostra era determinada a fim de possibilitar posterior comparação das unidades obtidas segundo os dois métodos (gama e gravimétrico).
- e) As dimensões ao longo das três direções perpendiculares da amostra eram então obtidas, a partir de médias de 4 repetições. Essas determinações eram feitas após toda varredura, tendo em vista a reprodutibilidade da madeira durante o processo de secagem.
- f) Durante as determinações de massa e dimensões das amostras, era feita contagem, por 4 minutos, de  $I_0$  (intensidade do feixe incidente).
- g) A umidade correspondente a cada um dos 25 "planos" ao longo da amostra era, então, determinada através das equações (26) e (31), já descritas no item 4.2. Para tal, eram inseridos no computador:
- g.1. os valores de  $\tau$  e dos coeficientes de atenuação de massa ( $\mu_m$  e  $\mu_w$ ) determinados como descrito em 5.1.2. e 5.2.2., respectivamente.
  - g.2. o relacionamento analítico entre a densidade da água adsorvida e a umidade da madeira, determinado em 5.2.3.
  - g.3. os valores do ponto de saturação de fibra ( $U_f$ ) de *Pinus oocarpa*, determinado em 5.3., e da densidade da água adsorvida a este teor de umidade ( $d_{af}$ ) determinado através da equação (56).
  - g.4. as equações (26) e (31) descritas em 4.2.

- g.5. o valor de  $I_0$ , que era corrigido de acordo com a equação (52).
- g.6. o valor de  $d_m$ , obtido segundo a equação (3), após conhecida a massa seca da amostra.
- g.7. o valor de  $x$  (dimensão da amostra ao longo do feixe de radiação).
- g.8. o valor de  $I$ , que era corrigido de acordo com a equação (52).

A Figura 8 ilustra o fluxograma de entrada e computação dos dados para a determinação das distribuições de umidade.



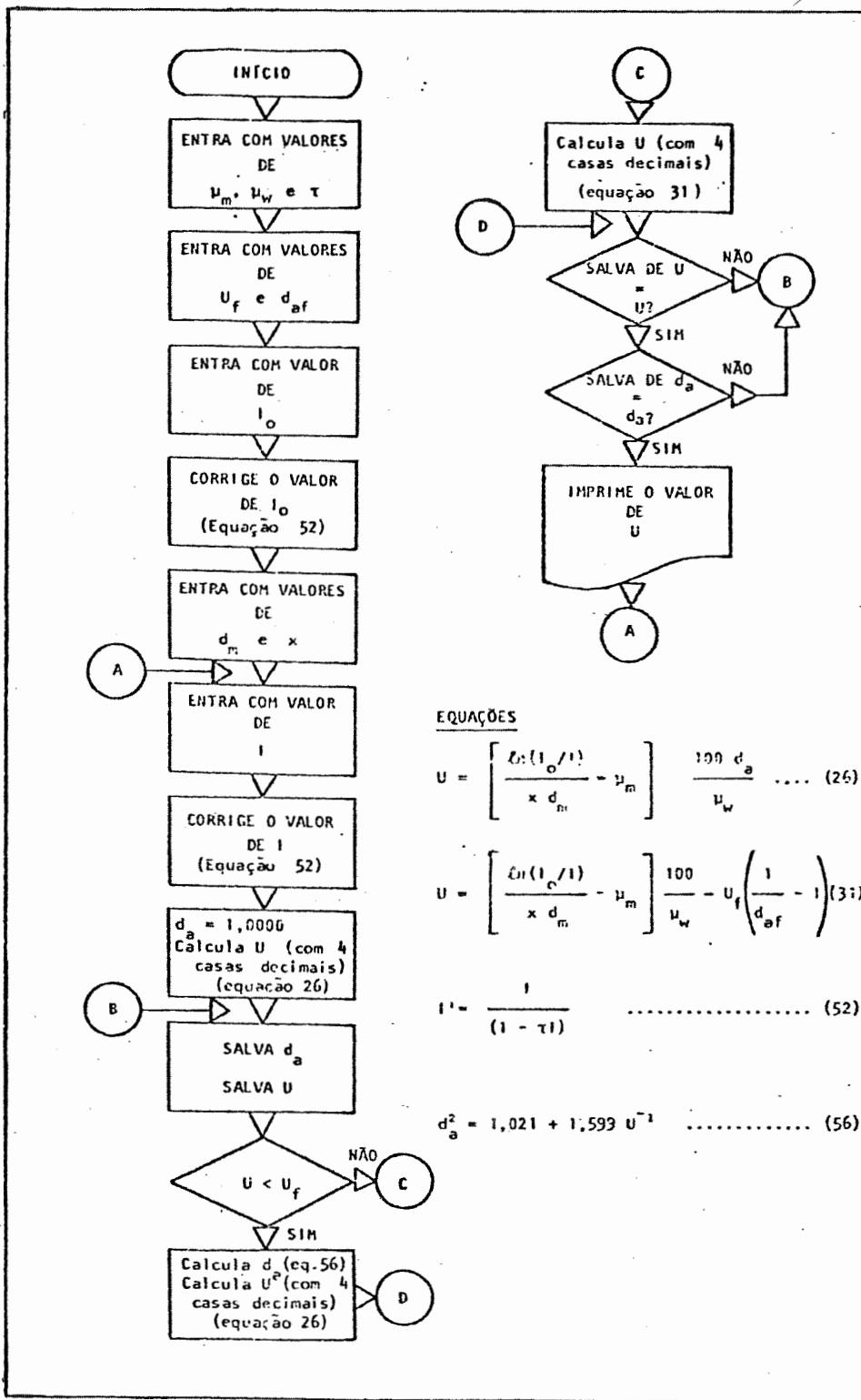


Figura 8 - Fluxograma de entrada e computação dos dados para a determinação de umidade de madeira (U,%)

---

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

### 6.1. Coeficientes de atenuação de massa

Os coeficientes de atenuação de massa obtidos experimentalmente ( $\mu_e$ ) para a água e espécies de madeira estudadas encontram-se na Tabela 2, onde também são apresentados os valores teóricos ( $\mu_t$ ) obtidos para a água e Pinus. Os coeficientes de atenuação de massa teóricos de Cedro e Marfim não foram determinados devido à falta de informações na literatura acerca de suas composições químicas.

Tabela 2 - Coeficientes de atenuação de massa experimentais e teóricos da água e das espécies de madeira estudadas

| Material | $\mu_t$ (cm <sup>2</sup> /g) | $\mu_e$ (cm <sup>2</sup> /g) | CV (%) | Nº de Determinações |
|----------|------------------------------|------------------------------|--------|---------------------|
| Água     | 0,20496                      | 0,2034 ± 0,0003              | 0,42   | 08                  |
| Pinus    | 0,18909                      | 0,1855 ± 0,0005              | 1,08   | 15                  |
| Cedro    | -                            | 0,1858 ± 0,0006              | 1,17   | 15                  |
| Marfim   | -                            | 0,1879 ± 0,0006              | 1,22   | 15                  |

Como se nota, os valores experimentais obtidos foram muito bons, tendo em vista os baixos desvios padrões e coeficientes de variação (CV). Isto se deve, principalmente, à boa colimação e à alta taxa de contagem com as quais se trabalhou. Outro fator importante considerado é que, como para baixas energias a contribuição do espalhamento Compton nas contagens cresce com o aumento da espessura do absorvedor, este efeito foi minimizado aplicando-se, na maioria das determinações, o critério recomendado por *GOPAL* e *SANJEEVAIAH (1973)* de que  $\mu x < 1$ .

Também o método de serragem utilizado contribuiu para a boa precisão das medidas, já que, além de ter-se melhor precisão na determinação do volume da amostra de madeira, são minimizados os erros decorrentes da variabilidade de densidade ao longo da amostra e da presença de umidade residual na amostra.

Aplicando-se o teste estatístico "t" para comparar os coeficientes teórico e experimental da água, obteve-se  $t_{\text{água}} = 5,20$ . O mesmo procedimento foi repetido para Pinus, obtendo-se  $t_{\text{pinus}} = 7,18$ . Observou-se que, em ambos os casos, os valores diferem significativamente. Isto deve-se ao fato de que os valores obtidos experimentalmente dependem da geometria utilizada, o que não acontece com os valores teóricos.

## 6.2. Densidade da água adsorvida

Conforme já descrito no item 5.2., a densidade da água adsorvida na madeira foi determinada em função da umidade da madeira.

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3 e Figura 9.

Tabela 3 - Densidade da água adsorvida na madeira ( $\bar{d}_a$ , g/cm<sup>3</sup>) em função da umidade da madeira (U,%)

| U (%) | $\bar{d}_a$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Número de determinações |
|-------|----------------------------------|-------------------------|
| 25,44 | 1,064 ± 0,002                    | 12                      |
| 18,27 | 1,047 ± 0,006                    | 12                      |
| 14,51 | 1,052 ± 0,002                    | 12                      |
| 9,13  | 1,088 ± 0,006                    | 12                      |
| 5,98  | 1,142 ± 0,016                    | 12                      |
| 5,21  | 1,153 ± 0,010                    | 12                      |

Feita a regressão testando-se 24 funções, obteve-se uma correlação entre estas variáveis, significativa ao nível de 1% ( $r = 0,957^{**}$ ), descrita pela equação (56) e representada também na Figura 9.

$$\bar{d}_a^2 = 1,021 + 1,599 U^{-1} \dots\dots\dots (56)$$

Assim, nota-se que a densidade da água adsorvida na madeira decresce com o aumento de umidade, abaixo do ponto de saturação de fibra, atingindo altos valores a baixos teores de umidade. Esta mesma tendência já tinha sido descrita por MacLEAN (1952), em cujo trabalho os valores da densidade da água estão, no entanto, superestimados (WEATHERWAX e TARKOW, 1968). Como já discutido no item 3.4., a densidade da água adsorvida correspondente ao ponto de saturação de fibra ( $U \approx 30\%$ ) é 1,017 g/cm<sup>3</sup> e não 1,115 g/cm<sup>3</sup>. O valor encontrado no presente trabalho, deduzido da equação (56), é 1,036 g/cm<sup>3</sup> para este teor de umidade, correspondendo a um er-

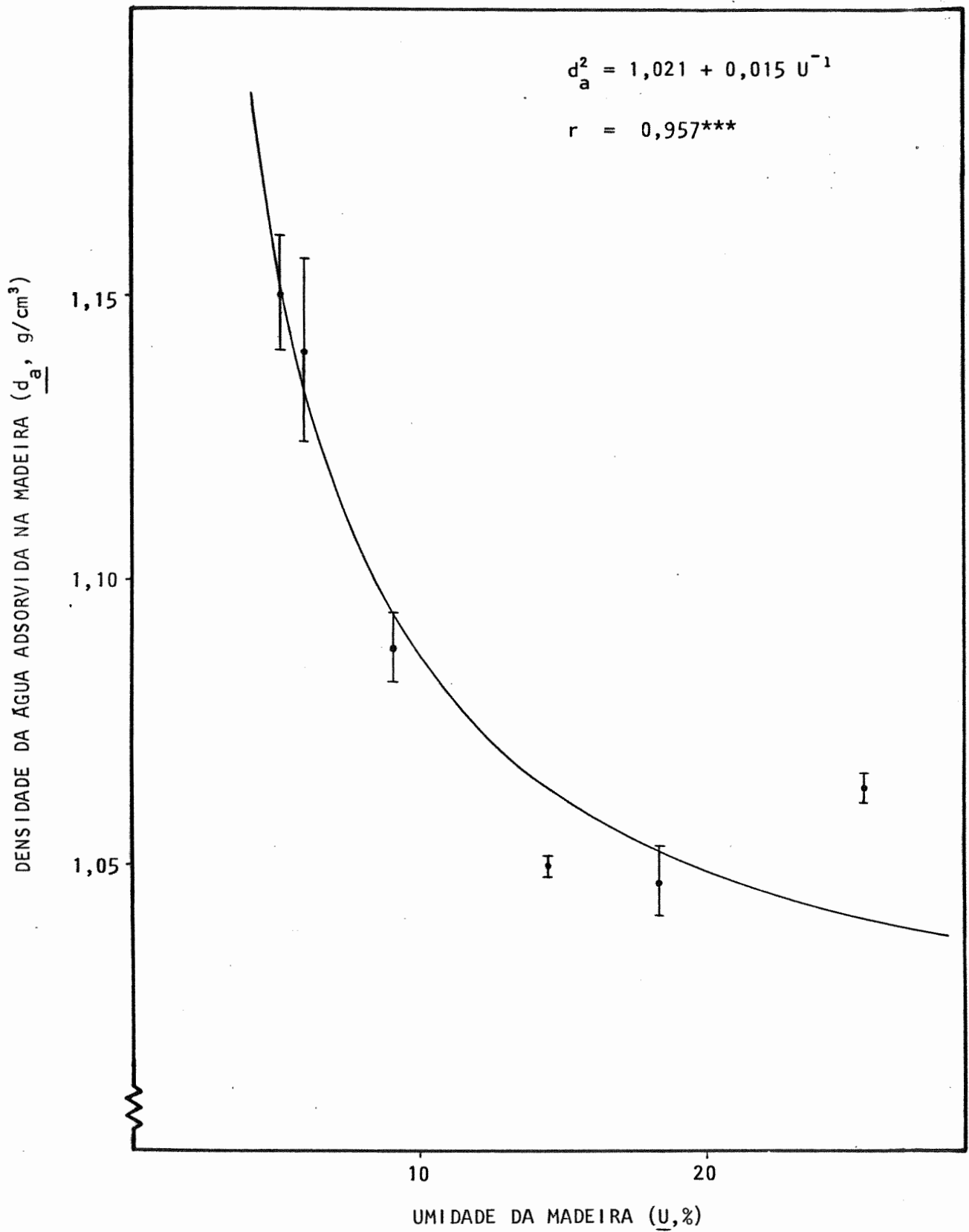


Figura 9 - Densidade da água adsorvida na madeira ( $\bar{d}_a$ , g/cm<sup>3</sup>) em função da umidade da madeira ( $\underline{U}$ , %)

ro relativo porcentual de 2%, em relação ao valor proposto por WEATHERWAX e TARKOW (1968).

A metodologia desenvolvida no presente trabalho que, como visto, apresentou sensibilidade na determinação da densidade da água adsorvida, pode, no entanto, ser aprimorada trabalhando-se com amostras em forma de serragem e não de placas e utilizando-se o método de compactações descrito no item 5.2.2. Assim, erros decorrentes da determinação do volume da amostra de madeira, bem como da variabilidade de densidade ao longo da amostra são minimizados.

### 6.3. Ponto de saturação de fibra

Com os dados obtidos nos condicionamentos descritos no item 5.2.3., determinou-se a retratibilidade volumétrica porcentual de *Pinus oocarpa* em função da umidade. A Tabela 4 e Figura 10 ilustram este relacionamento.

Tabela 4 - Retrabilidade volumétrica porcentual ( $R_v$ , %) de *Pinus oocarpa* em função da umidade da madeira ( $U$ ,%)

| U (%) | $R_v$ (%)   | Número de determinações |
|-------|-------------|-------------------------|
| 27,40 | 1,01 ± 0,19 | 4                       |
| 18,89 | 2,87 ± 0,29 | 4                       |
| 15,57 | 4,30 ± 0,10 | 4                       |
| 9,60  | 6,26 ± 0,12 | 4                       |
| 6,45  | 7,49 ± 0,27 | 4                       |
| 5,95  | 7,38 ± 0,12 | 4                       |

$$\frac{a}{d_b} = [0,398 \pm 0,002] \text{ g/cm}^3$$

Pelos dados apresentados, verifica-se uma correlação linear entre estas duas variáveis, que pode ser expressa pela equação (57).

$$R_V = 9,2540 - 0,3126 U \dots\dots\dots (57)$$

com coeficiente de correlação significativo ao nível de 1% ( $r = 0,994^{**}$ ).

A alta correlação encontrada entre as variáveis deve-se em grande parte à homogeneidade entre as amostras, cujas densidades básicas a apresentaram um baixo coeficiente de variação ( $CV = 0,75\%$ ).

Como já discutido em 5.3., o ponto de saturação de fibra da espécie de madeira em estudo foi determinado através do intercepto no eixo das abscissas da curva ilustrada na Figura 10, obtendo-se  $U_f = 29,6\%$ . Este valor mostrou-se bem próximo do valor médio, à mesma temperatura, apresentado por *STAMM (1964)* para 52 espécies de coníferas diferentes (29,0%).

Já que na etapa experimental descrita em 5.4. as amostras permaneceram em câmara climatizada a  $25^{\circ}\text{C}$ , o valor obtido (29,6%) foi corrigido segundo *STAMM (1971)*: a cada decréscimo de  $1^{\circ}\text{C}$  na temperatura, corresponde um acréscimo de 0,1% no valor do ponto de saturação de fibra. Assim, nesta etapa experimental, o valor considerado para o ponto de saturação de fibra foi 31,1%.

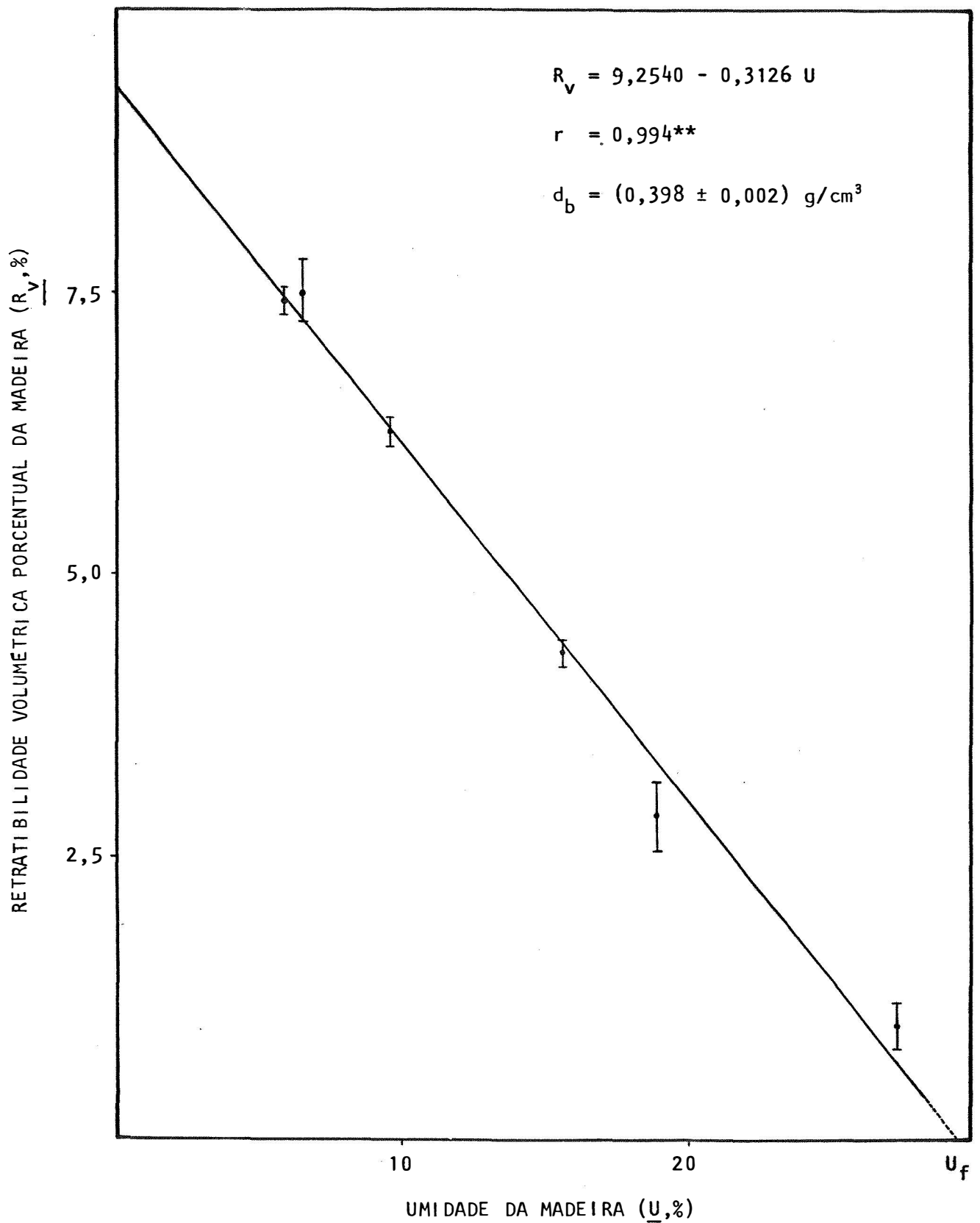


Figura 10 - Retratibilidade volumétrica porcentual ( $R_v, \%$ ) da madeira de *Pinus oocarpa* em função de sua umidade ( $U, \%$ )



#### 6.4. Gradientes de umidade

As Tabelas 5 a 9 e Figuras 11 a 15 ilustram os gradientes de umidade relativos a cada amostra utilizada e que foram determinadas em 5 instantes da secagem, conforme metodologia descrita em 5.4.

Os dados referentes ao instante  $t = 0,0$  d correspondem ao início da secagem, quando as amostras foram colocadas, saturadas, na câmara descrita em 5.4.1. Já os dados referentes ao instante  $t = 53,0$  d, correspondem ao estágio final da secagem, quando as amostras, praticamente, já tinham atingido a umidade de equilíbrio com o meio ambiente.

As curvas apresentadas nas Figuras 11 a 15 foram obtidas a partir de regressões parabólicas simples, da forma  $y = a_0 + a_1x + a_2x^2$ , determinadas a partir dos dados experimentais. A escolha deste modelo de regressão baseou-se em testes preliminares que mostraram ser este, dentre os diversos modelos analisados, o que melhor se ajustou aos dados experi-mentais.

Na Tabela 10 são apresentados os coeficientes das regres-sões obtidas, relativas a 15 instantes da secagem, incluídos os 5 acima citados.

Tabela 5 - Distribuição de umidade ( $\underline{U}$ ,%) na amostra nº 1, em diferentes instantes da secagem ( $\underline{t}$ , dia)

| Posição<br>( $\underline{x}$ , cm) | Umidade ( $\underline{U}$ ,%)  |       |       |       |       |
|------------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                    | tempo ( $\underline{t}$ , dia) |       |       |       |       |
|                                    | 0,0                            | 2,0   | 4,0   | 7,0   | 53,0  |
| 0,50                               | 174,72                         | 18,59 | 12,47 | 11,41 | 8,37  |
| 1,00                               | 134,60                         | 23,90 | 14,35 | 13,29 | 7,37  |
| 1,50                               | 134,60                         | 35,47 | 19,21 | 14,46 | 7,44  |
| 2,00                               | 132,71                         | 44,35 | 22,15 | 14,95 | 8,74  |
| 2,50                               | 133,91                         | 46,17 | 23,21 | 15,53 | 10,23 |
| 3,00                               | 135,63                         | 51,40 | 25,90 | 16,95 | 7,54  |
| 3,50                               | 135,68                         | 55,22 | 29,36 | 18,95 | 11,13 |
| 4,00                               | 133,41                         | 58,55 | 31,91 | 20,92 | 9,39  |
| 4,50                               | 137,14                         | 61,67 | 35,54 | 22,15 | 9,07  |
| 5,00                               | 136,05                         | 53,72 | 34,74 | 19,02 | 8,39  |
| 5,50                               | 135,94                         | 55,84 | 34,81 | 19,57 | 7,60  |
| 6,00                               | 135,84                         | 59,16 | 32,75 | 21,13 | 11,07 |
| 6,50                               | 134,89                         | 52,64 | 31,67 | 19,78 | 9,38  |
| 7,00                               | 135,65                         | 53,99 | 32,01 | 19,61 | 8,13  |
| 7,50                               | 135,25                         | 54,76 | 34,09 | 21,52 | 8,71  |
| 8,00                               | 134,86                         | 52,52 | 30,75 | 17,56 | 5,80  |
| 8,50                               | 136,98                         | 49,42 | 33,10 | 20,67 | 8,94  |
| 9,00                               | 136,30                         | 54,97 | 28,71 | 16,94 | 9,14  |
| 9,50                               | 136,69                         | 48,97 | 27,72 | 17,78 | 8,45  |
| 10,00                              | 137,08                         | 44,67 | 21,29 | 16,41 | 8,54  |
| 10,50                              | 133,18                         | 45,15 | 22,49 | 14,92 | 7,89  |
| 11,00                              | 138,26                         | 40,84 | 18,45 | 13,68 | 8,85  |
| 11,50                              | 138,61                         | 31,40 | 14,44 | 12,37 | 6,68  |
| 12,00                              | 152,25                         | 32,54 | 14,85 | 9,95  | 5,62  |
| 12,50                              | 168,08                         | 19,58 | 12,49 | 11,83 | 6,90  |

Tabela 6 - Distribuição de umidade ( $\underline{U}$ ,%) na amostra nº 2, em diferentes instantes da secagem ( $\underline{t}$ , dia)

| Posição<br>( $\underline{x}$ , cm) | Umidade ( $\underline{U}$ ,%)  |       |       |       |       |
|------------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                    | tempo ( $\underline{t}$ , dia) |       |       |       |       |
|                                    | 0,0                            | 2,0   | 4,0   | 7,0   | 53,0  |
| 0,50                               | 168,74                         | 20,96 | 16,23 | 14,23 | 09,96 |
| 1,00                               | 154,96                         | 33,16 | 18,61 | 12,93 | 08,61 |
| 1,50                               | 137,05                         | 33,34 | 17,92 | 13,49 | 08,59 |
| 2,00                               | 129,97                         | 37,73 | 19,32 | 18,27 | 08,68 |
| 2,50                               | 127,66                         | 39,76 | 29,60 | 17,09 | 07,82 |
| 3,00                               | 125,74                         | 45,15 | 24,45 | 15,82 | 09,03 |
| 3,50                               | 121,43                         | 49,75 | 25,97 | 18,21 | 09,12 |
| 4,00                               | 120,22                         | 44,94 | 34,28 | 18,43 | 08,68 |
| 4,50                               | 117,28                         | 39,86 | 35,54 | 19,33 | 08,80 |
| 5,00                               | 115,71                         | 42,64 | 34,85 | 21,36 | 09,21 |
| 5,50                               | 117,70                         | 45,16 | 34,97 | 18,93 | 11,15 |
| 6,00                               | 118,48                         | 49,74 | 35,88 | 20,39 | 10,11 |
| 6,50                               | 119,28                         | 44,82 | 31,99 | 19,03 | 09,86 |
| 7,00                               | 118,13                         | 42,59 | 33,57 | 19,86 | 08,98 |
| 7,50                               | 116,34                         | 53,10 | 33,40 | 21,37 | 11,10 |
| 8,00                               | 116,11                         | 42,69 | 32,78 | 18,99 | 10,59 |
| 8,50                               | 116,42                         | 47,37 | 32,86 | 19,85 | 10,66 |
| 9,00                               | 117,14                         | 45,16 | 32,27 | 18,93 | 13,15 |
| 9,50                               | 120,98                         | 48,73 | 35,45 | 20,42 | 13,45 |
| 10,00                              | 121,30                         | 41,68 | 29,12 | 19,96 | 11,54 |
| 10,50                              | 124,97                         | 42,90 | 25,18 | 14,63 | 09,65 |
| 11,00                              | 124,14                         | 34,24 | 21,27 | 19,29 | 08,86 |
| 11,50                              | 130,16                         | 37,33 | 19,92 | 18,26 | 12,74 |
| 12,00                              | 136,26                         | 17,68 | 14,36 | 16,93 | 12,66 |
| 12,50                              | 176,86                         | 12,27 | 12,10 | 12,95 | 09,94 |

Tabela 7 - Distribuição de umidade ( $\underline{U}$ ,%) na amostra nº 3, em diferentes instantes da secagem ( $\underline{t}$ , dia)

| Posição<br>( $\underline{x}$ , cm) | Umidade ( $\underline{U}$ ,%)  |       |       |       |       |
|------------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                    | tempo ( $\underline{t}$ , dia) |       |       |       |       |
|                                    | 0,0                            | 2,0   | 4,0   | 7,0   | 53,0  |
| 0,50                               | 158,00                         | 16,83 | 14,20 | 12,21 | 06,47 |
| 1,00                               | 130,97                         | 31,43 | 17,31 | 13,07 | 09,56 |
| 1,50                               | 125,32                         | 41,15 | 18,95 | 15,19 | 07,19 |
| 2,00                               | 126,11                         | 44,86 | 21,00 | 16,53 | 07,13 |
| 2,50                               | 127,09                         | 53,44 | 26,92 | 17,45 | 09,44 |
| 3,00                               | 127,71                         | 48,45 | 33,49 | 18,47 | 07,54 |
| 3,50                               | 121,46                         | 51,94 | 35,53 | 17,74 | 06,83 |
| 4,00                               | 129,29                         | 54,44 | 37,13 | 20,21 | 09,11 |
| 4,50                               | 129,82                         | 53,94 | 38,83 | 19,76 | 08,14 |
| 5,00                               | 128,22                         | 50,05 | 38,72 | 26,02 | 07,79 |
| 5,50                               | 127,24                         | 60,31 | 37,23 | 26,13 | 09,55 |
| 6,00                               | 124,86                         | 48,99 | 36,62 | 27,57 | 07,19 |
| 6,50                               | 121,88                         | 47,50 | 37,49 | 24,91 | 06,78 |
| 7,00                               | 127,86                         | 45,27 | 34,51 | 21,53 | 05,90 |
| 7,50                               | 125,17                         | 54,16 | 35,25 | 24,44 | 06,97 |
| 8,00                               | 121,69                         | 48,56 | 34,17 | 22,13 | 07,14 |
| 8,50                               | 122,89                         | 46,39 | 34,17 | 20,55 | 07,46 |
| 9,00                               | 120,36                         | 41,83 | 31,86 | 17,85 | 07,21 |
| 9,50                               | 124,95                         | 45,65 | 26,76 | 16,81 | 08,81 |
| 10,00                              | 124,20                         | 46,11 | 24,62 | 14,37 | 07,90 |
| 10,50                              | 126,09                         | 42,31 | 19,25 | 14,22 | 04,32 |
| 11,00                              | 125,88                         | 34,66 | 14,86 | 12,84 | 06,29 |
| 11,50                              | 127,48                         | 33,93 | 12,90 | 11,86 | 04,58 |
| 12,00                              | 131,21                         | 23,64 | 11,12 | 12,31 | 06,91 |
| 12,50                              | 161,25                         | 18,11 | 11,65 | 09,24 | 07,85 |

Tabela 8 - Distribuição de umidade ( $\underline{U}$ ,%) na amostra nº 4, em diferentes instantes da secagem ( $\underline{t}$ , dia)

| Posição<br>( $\underline{x}$ , cm) | Umidade ( $\underline{U}$ ,%)  |       |       |       |       |
|------------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                    | tempo ( $\underline{t}$ , dia) |       |       |       |       |
|                                    | 0,0                            | 2,0   | 4,0   | 7,0   | 53,0  |
| 0,50                               | 189,28                         | 25,33 | 11,42 | 13,35 | 11,50 |
| 1,00                               | 178,83                         | 35,38 | 10,34 | 13,21 | 09,98 |
| 1,50                               | 148,67                         | 47,25 | 12,46 | 13,92 | 09,70 |
| 2,00                               | 154,63                         | 48,18 | 13,91 | 13,99 | 11,32 |
| 2,50                               | 156,03                         | 51,41 | 20,64 | 15,90 | 10,34 |
| 3,00                               | 148,91                         | 62,73 | 24,27 | 16,85 | 09,29 |
| 3,50                               | 151,50                         | 56,45 | 31,21 | 18,89 | 10,71 |
| 4,00                               | 147,80                         | 64,18 | 34,33 | 19,27 | 12,93 |
| 4,50                               | 150,61                         | 57,93 | 36,45 | 18,64 | 11,50 |
| 5,00                               | 151,79                         | 61,36 | 36,95 | 20,43 | 10,07 |
| 5,50                               | 150,04                         | 67,76 | 38,26 | 27,13 | 09,47 |
| 6,00                               | 148,62                         | 62,71 | 37,95 | 28,26 | 11,26 |
| 6,50                               | 149,84                         | 67,59 | 38,42 | 26,79 | 11,73 |
| 7,00                               | 148,14                         | 69,17 | 39,82 | 23,44 | 08,91 |
| 7,50                               | 149,56                         | 76,03 | 40,32 | 23,74 | 10,46 |
| 8,00                               | 148,36                         | 66,54 | 38,41 | 24,76 | 11,16 |
| 8,50                               | 147,81                         | 66,82 | 38,99 | 20,46 | 11,74 |
| 9,00                               | 153,18                         | 66,08 | 35,03 | 19,11 | 10,21 |
| 9,50                               | 147,80                         | 63,74 | 37,81 | 15,14 | 10,52 |
| 10,00                              | 150,84                         | 74,46 | 31,11 | 15,00 | 09,68 |
| 10,50                              | 146,08                         | 59,97 | 22,16 | 14,87 | 09,00 |
| 11,00                              | 147,07                         | 60,61 | 17,39 | 12,92 | 06,89 |
| 11,50                              | 151,99                         | 45,91 | 15,01 | 13,23 | 06,76 |
| 12,00                              | 145,13                         | 36,95 | 08,57 | 12,30 | 07,40 |
| 12,50                              | 194,32                         | 20,98 | 09,50 | 10,87 | 06,92 |

Tabela 9 - Distribuição de umidade ( $\underline{U},\%$ ) na amostra nº 5, em diferentes instantes da secagem ( $\underline{t}, \text{dia}$ )

| Posição<br>( $\underline{x}, \text{cm}$ ) | Umidade ( $\underline{U},\%$ )        |       |       |       |       |
|---|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|   | tempo ( $\underline{t}, \text{dia}$ ) |       |       |       |       |
|   | 0,0                                   | 2,0   | 4,0   | 7,0   | 53,0  |
| 0,50                                      | 186,75                                | 17,83 | 15,24 | 8,48  | 8,62  |
| 1,00                                      | 160,90                                | 26,35 | 17,19 | 10,93 | 8,43  |
| 1,50                                      | 154,31                                | 35,20 | 16,30 | 10,68 | 10,72 |
| 2,00                                      | 143,83                                | 46,80 | 19,04 | 11,20 | 10,35 |
| 2,50                                      | 136,75                                | 46,88 | 21,86 | 12,06 | 9,54  |
| 3,00                                      | 143,57                                | 41,11 | 21,89 | 14,19 | 10,79 |
| 3,50                                      | 137,10                                | 46,99 | 25,52 | 13,39 | 12,46 |
| 4,00                                      | 137,98                                | 53,34 | 25,00 | 12,39 | 9,27  |
| 4,50                                      | 134,51                                | 55,53 | 24,65 | 13,84 | 8,50  |
| 5,00                                      | 139,43                                | 56,95 | 25,58 | 13,42 | 10,72 |
| 5,50                                      | 136,13                                | 59,47 | 26,77 | 11,38 | 11,07 |
| 6,00                                      | 133,40                                | 59,84 | 28,11 | 13,83 | 8,49  |
| 6,50                                      | 133,64                                | 58,39 | 26,97 | 12,63 | 10,09 |
| 7,00                                      | 131,56                                | 60,96 | 26,65 | 13,41 | 9,96  |
| 7,50                                      | 132,15                                | 43,94 | 28,60 | 15,80 | 11,42 |
| 8,00                                      | 135,34                                | 45,96 | 28,88 | 14,07 | 7,67  |
| 8,50                                      | 136,64                                | 54,80 | 24,68 | 13,18 | 11,62 |
| 9,00                                      | 134,63                                | 48,03 | 25,19 | 13,00 | 9,36  |
| 9,50                                      | 137,61                                | 48,64 | 24,55 | 11,13 | 9,94  |
| 10,00                                     | 138,97                                | 52,58 | 21,51 | 13,30 | 7,40  |
| 10,50                                     | 140,16                                | 41,58 | 22,05 | 12,17 | 7,75  |
| 11,00                                     | 145,80                                | 47,51 | 16,34 | 12,14 | 8,21  |
| 11,50                                     | 147,05                                | 29,68 | 16,77 | 11,59 | 9,31  |
| 12,00                                     | 155,55                                | 31,56 | 12,90 | 10,10 | 7,40  |
| 12,50                                     | 186,21                                | 19,03 | 14,85 | 7,54  | 8,72  |

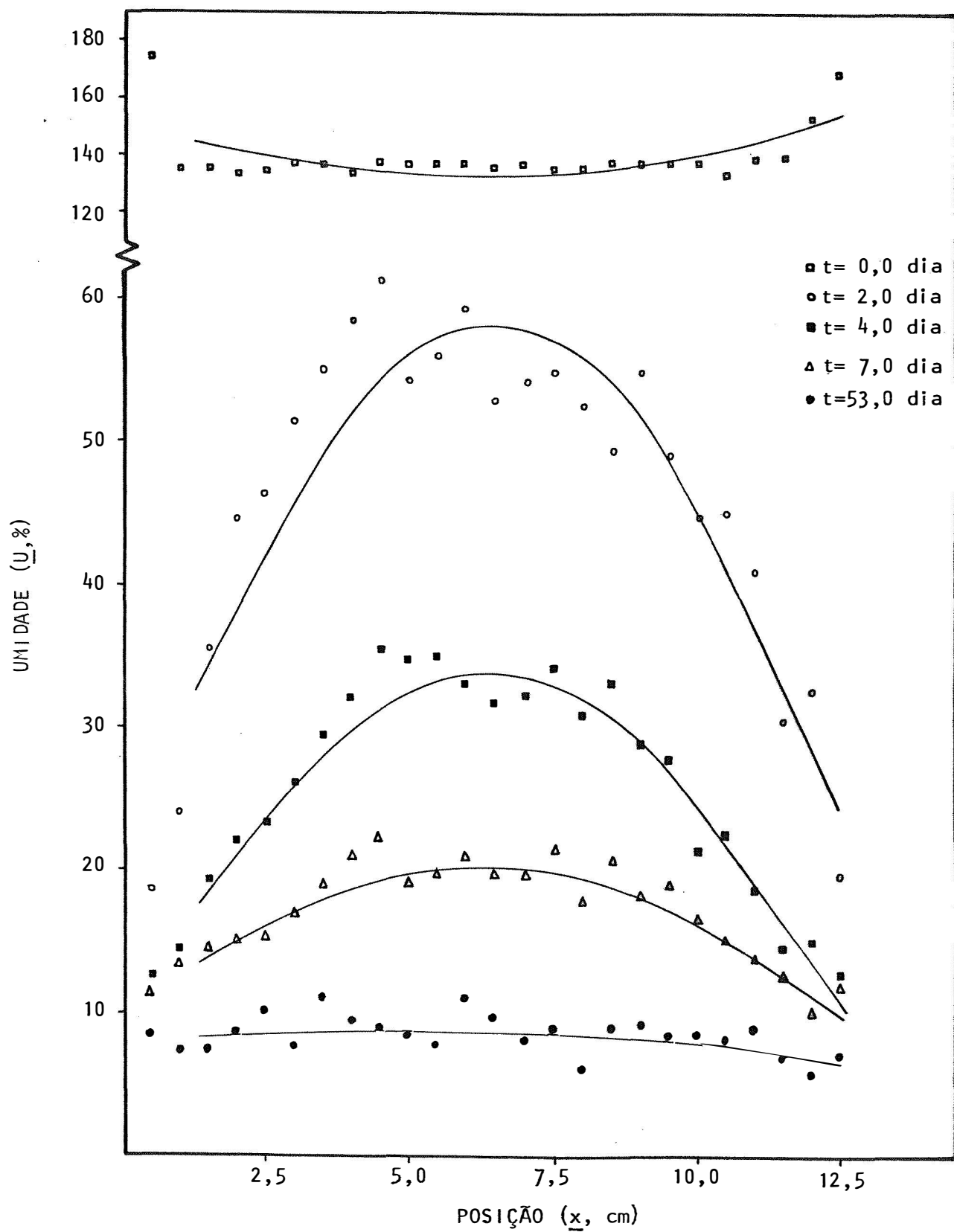


Figura 11 - Gradientes de umidade da amostra nº 1 em diferentes instantes da secagem

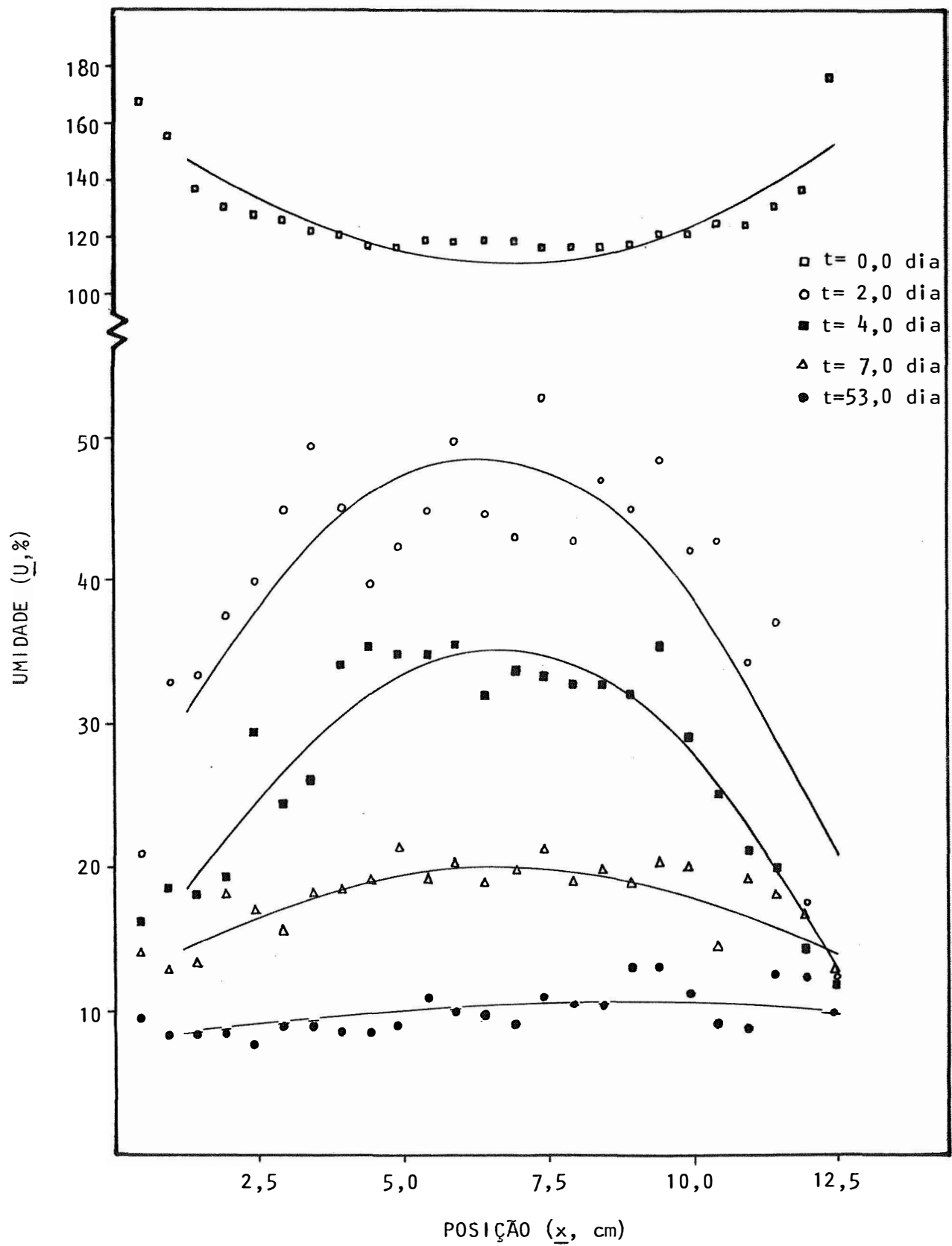


Figura 12 - Gradientes de umidade da amostra nº 2 em diferentes instantes da secagem



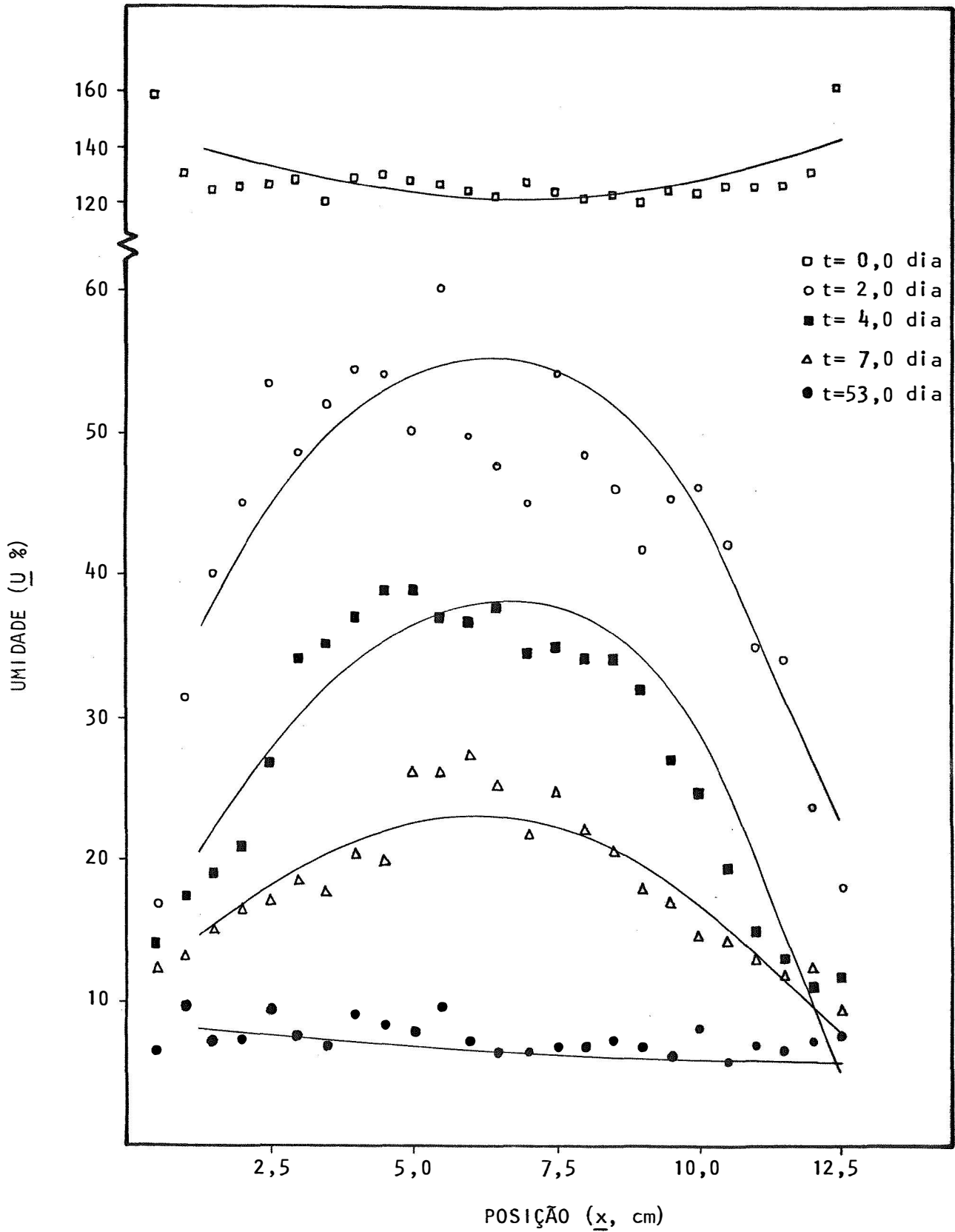


Figura 13 - Gradientes de umidade da amostra nº 3 em diferentes instantes da secagem

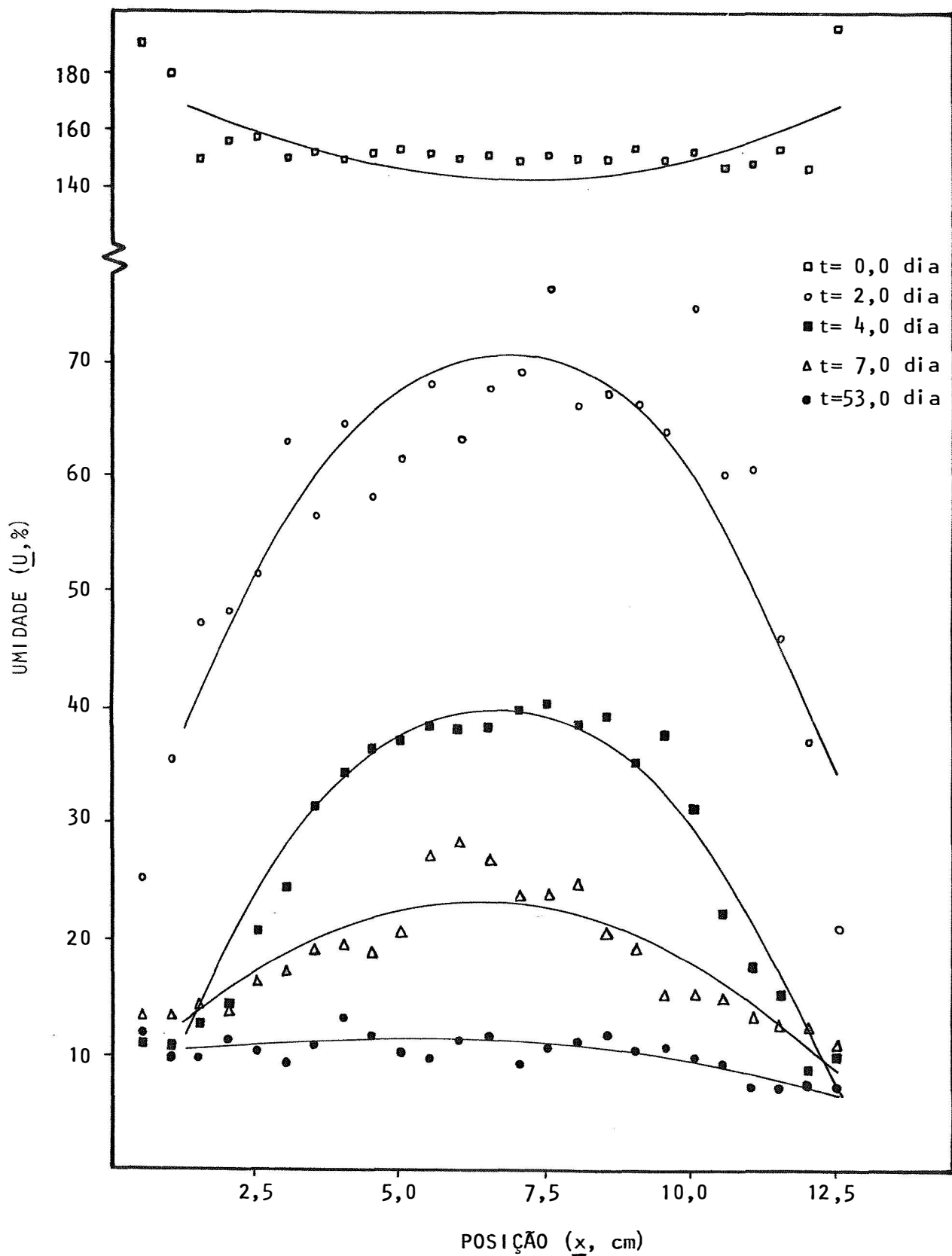


Figura 14 - Gradientes de umidade da amostra nº 4 em diferentes instantes da secagem

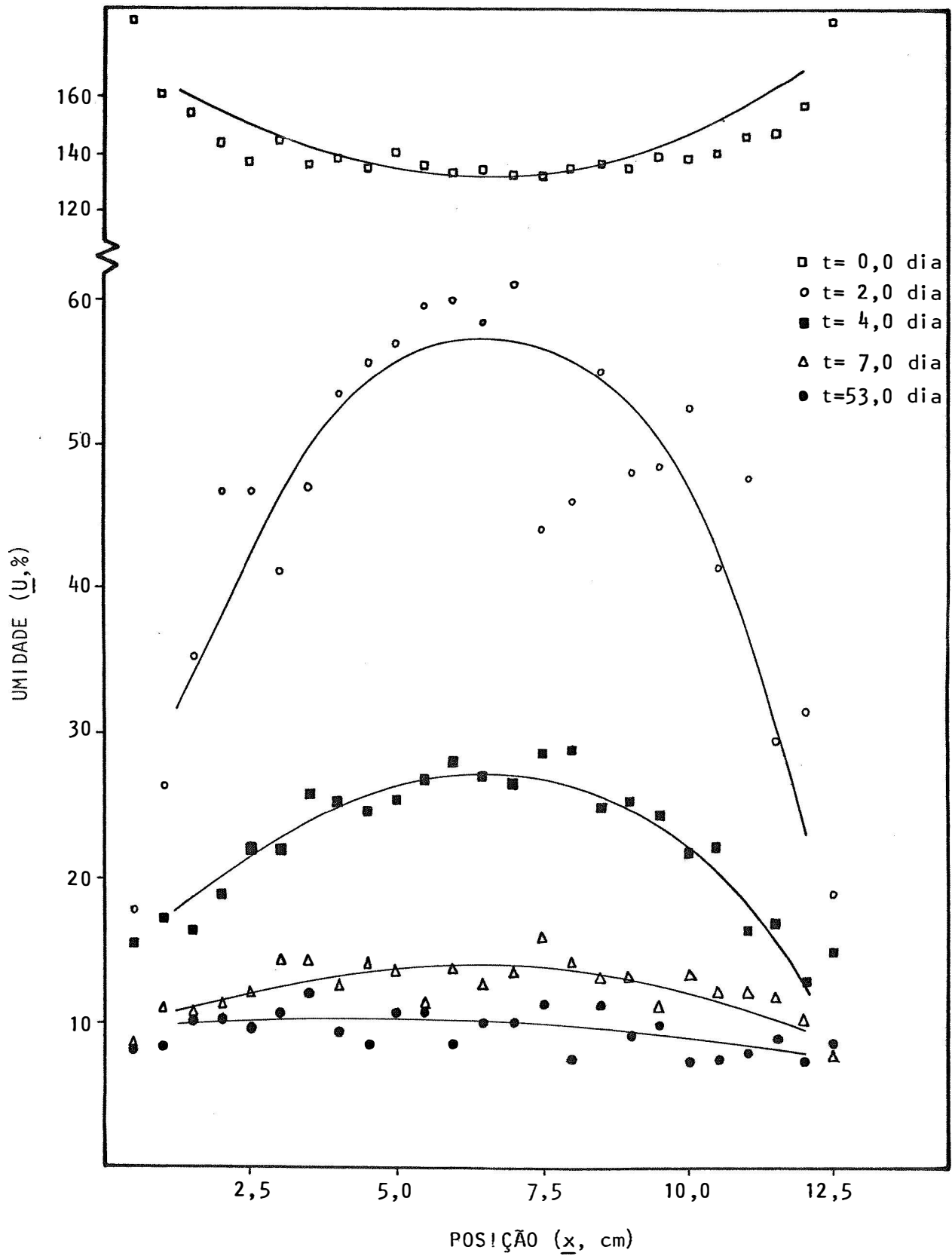


Figura 15 - Gradientes de umidade da amostra nº 5 em diferentes instantes da secagem

Tabela 10 - Coeficientes das regressões relativas às distribuições de umidade em 15 instantes  
( $t$ , dia) da secagem

| t<br>(dia) | Coeficientes |       |       |                     |       |       |              |                     |       |              |       |          |              |       |       |                     |       |       |       |                     |
|------------|--------------|-------|-------|---------------------|-------|-------|--------------|---------------------|-------|--------------|-------|----------|--------------|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|---------------------|
|            | Amostra Nº 1 |       |       | Amostra Nº 2        |       |       | Amostra Nº 3 |                     |       | Amostra Nº 4 |       |          | Amostra Nº 5 |       |       |                     |       |       |       |                     |
|            | $a_0$        | $a_1$ | $a_2$ | $a_0$               | $a_1$ | $a_2$ | $a_0$        | $a_1$               | $a_2$ | $a_0$        | $a_1$ | $a_2$    | $a_0$        | $a_1$ | $a_2$ | $a_0$               | $a_1$ | $a_2$ | $r$   |                     |
| 0,0        | 153,5        | -7,0  | 0,56  | 0,666***            | 166,0 | -16,2 | 1,20         | 0,885***            | 146,4 | -7,2         | 0,56  | 0,660*** | 179,6        | -10,0 | 0,72  | 0,683***            | 177,5 | -11,6 | 1,12  | 0,881***            |
| 0,8        | 98,7         | -17,4 | 1,40  | 0,729***            | 132,9 | -23,2 | 1,64         | 0,784***            | 102,4 | -17,2        | 1,40  | 0,730*** | 118,3        | -19,0 | 1,38  | 0,709***            | 140,4 | -27,6 | 2,16  | 0,869***            |
| 2,0        | 18,4         | 12,6  | -1,00 | 0,946***            | 20,7  | 9,2   | -0,72        | 0,869***            | 25,5  | 9,8          | -0,80 | 0,859*** | 21,1         | 14,8  | -1,08 | 0,909***            | 17,5  | 12,4  | -0,96 | 0,910***            |
| 3,0        | 9,2          | 11,0  | -0,88 | 0,951***            | 12,5  | 10,4  | -0,80        | 0,933***            | 8,3   | 11,8         | -0,92 | 0,959*** | 6,9          | 14,2  | -1,08 | 0,953***            | 7,5   | 10,0  | -0,76 | 0,841***            |
| 4,0        | 8,5          | 8,0   | -0,64 | 0,973***            | 9,7   | 8,0   | -0,60        | 0,947***            | 9,2   | 9,8          | -0,80 | 0,966*** | -2,1         | 12,6  | -0,96 | 0,967***            | 11,5  | 5,0   | -0,40 | 0,960***            |
| 5,0        | 4,7          | 9,4   | -0,76 | 0,971***            | 8,8   | 8,2   | -0,64        | 0,918***            | 4,9   | 11,8         | -0,96 | 0,970*** | 0,9          | 13,8  | -1,04 | 0,944***            | 7,4   | 7,8   | -0,60 | 0,952***            |
| 7,0        | 9,9          | 3,4   | -0,28 | 0,941***            | 11,8  | 2,4   | -0,20        | 0,860***            | 9,2   | 4,6          | -0,40 | 0,919*** | 8,0          | 4,8   | -0,36 | 0,873***            | 8,6   | 1,6   | -0,12 | 0,821***            |
| 9,0        | 7,8          | 2,2   | -0,16 | 0,840***            | 10,2  | 1,4   | -0,08        | 0,732***            | 9,4   | 1,6          | -0,12 | 0,749*** | 9,6          | 1,4   | -0,12 | 0,750***            | 11,5  | 1,0   | -0,08 | 0,631***            |
| 11,0       | 9,1          | 1,4   | -0,12 | 0,778***            | 12,0  | 0,6   | -0,04        | 0,418*              | 8,2   | 0,8          | -0,08 | 0,613**  | 7,8          | 1,6   | -0,12 | 0,731***            | 11,8  | 0,8   | -0,01 | 0,467*              |
| 14,0       | 9,0          | 0,6   | -0,04 | 0,554**             | 6,4   | 1,8   | -0,12        | 0,681***            | 9,2   | 1,0          | -0,08 | 0,502**  | 9,8          | -0,4  | 0,04  | 0,370*              | 11,1  | 0,1   | -0,04 | 0,411*              |
| 18,0       | 10,1         | 0,6   | -0,04 | 0,249 <sup>ns</sup> | 6,9   | 1,8   | -0,16        | 0,796***            | 10,4  | 1,0          | -0,08 | 0,744*** | 7,8          | 0,6   | 0,00  | 0,323 <sup>ns</sup> | 6,6   | 0,1   | -0,01 | 0,095 <sup>ns</sup> |
| 24,0       | 6,9          | 1,0   | -0,08 | 0,620**             | 10,5  | 0,4   | -0,04        | 0,285 <sup>ns</sup> | 9,4   | -0,2         | 0,00  | 0,539**  | 10,0         | 0,4   | -0,04 | 0,597**             | 9,7   | 0,6   | -0,04 | 0,490*              |
| 30,0       | 8,8          | 0,4   | -0,04 | 0,424*              | 10,3  | 0,4   | -0,04        | 0,235 <sup>ns</sup> | 8,5   | 0,0          | -0,01 | 0,670*** | 9,3          | 0,4   | -0,04 | 0,584**             | 9,2   | 0,4   | -0,01 | 0,518**             |
| 44,0       | 7,9          | 0,6   | -0,04 | 0,632***            | 10,7  | -0,2  | -0,01        | 0,470*              | 5,7   | 0,2          | -0,04 | 0,565**  | 6,5          | 0,4   | -0,04 | 0,437*              | 9,0   | 0,8   | -0,04 | 0,488*              |
| 53,0       | 7,7          | 0,6   | -0,04 | 0,544**             | 8,4   | 0,2   | -0,04        | 0,708***            | 8,2   | -0,2         | -0,01 | 0,477*   | 9,7          | 0,6   | -0,08 | 0,772***            | 9,2   | 0,4   | -0,04 | 0,518**             |

<sup>a/</sup> níveis de significância: \*\*\* 0,1%    \*\* 1,0%    \* 5,0%

-ns (não significativo, significância > 10,0%)

A fim de se avaliar a metodologia desenvolvida no presente trabalho para a determinação de umidade de madeira, procurou-se comparar os valores obtidos a partir das distribuições de umidade com aqueles determinados segundo o método mais comumente usado (gravimétrico), já descrito no item 3.2. Para tal, o valor médio de cada uma das distribuições de umidade  $U(x)$ , cujas regressões são ilustradas na Tabela 10, foi determinado através da equação:

$$U = \frac{1}{L} \int_0^L U(x) dx \dots\dots\dots (58)$$

sendo L o comprimento da amostra na direção perpendicular à incidência do feixe de radiação  $\gamma$ .

Os valores assim obtidos e aqueles determinados segundo o método gravimétrico ( $U_{grav.}$ ) encontram-se na Tabela 11, onde também são apresentados os respectivos erros relativos percentuais, determinados de acordo com a equação

$$|\delta U| = \frac{|U - U_{grav.}|}{U_{grav.}} \times 100 \dots\dots\dots (59)$$

Os valores obtidos segundo os dois métodos, foram comparados através de análise de regressão linear, cujo resultado é o seguinte:

Tabela 11 - Unidades de madeira obtidas pelos métodos gama (U,%) e gravimétrico (U<sub>grav</sub>,%) em diferentes instantes da secagem (t, dia)

| t<br>(dias) | Amostra Nº 1 |                      |                   | Amostra Nº 2 |                      |                   | Amostra Nº 3 |                      |                   | Amostra Nº 4 |                      |                   | Amostra Nº 5 |                      |                   |
|-------------|--------------|----------------------|-------------------|--------------|----------------------|-------------------|--------------|----------------------|-------------------|--------------|----------------------|-------------------|--------------|----------------------|-------------------|
|             | U<br>(%)     | U<br>Relativo<br>(%) | U<br>grav.<br>(%) | U<br>(%)     | U<br>Relativo<br>(%) | U<br>grav.<br>(%) | U<br>(%)     | U<br>Relativo<br>(%) | U<br>grav.<br>(%) | U<br>(%)     | U<br>Relativo<br>(%) | U<br>grav.<br>(%) | U<br>(%)     | U<br>Relativo<br>(%) | U<br>grav.<br>(%) |
| 0,0         | 144,21       | 139,73               | 3,11              | 135,35       | 129,00               | 4,69              | 133,09       | 130,59               | 1,86              | 158,20       | 155,05               | 1,99              | 151,49       | 145,17               | 4,17              |
| 0,8         | 64,10        | 64,36                | 0,40              | 76,50        | 75,44                | 1,39              | 69,27        | 69,38                | 0,15              | 83,17        | 82,81                | 0,44              | 79,85        | 82,76                | 3,64              |
| 2,0         | 42,73        | 44,74                | 4,49              | 38,46        | 38,92                | 1,20              | 41,47        | 44,10                | 6,34              | 52,88        | 55,44                | 4,62              | 43,02        | 44,13                | 2,58              |
| 3,0         | 30,62        | 32,95                | 7,61              | 30,82        | 36,08                | 17,07             | 32,47        | 32,35                | 0,37              | 36,01        | 39,12                | 8,64              | 27,13        | 29,77                | 9,73              |
| 4,0         | 24,39        | 24,94                | 2,26              | 23,45        | 26,62                | 13,52             | 26,21        | 27,32                | 4,24              | 27,94        | 26,20                | 6,23              | 21,46        | 21,86                | 1,86              |
| 5,0         | 20,91        | 24,55                | 17,41             | 20,20        | 27,22                | 34,75             | 22,72        | 28,63                | 26,01             | 23,29        | 31,54                | 35,42             | 18,35        | 23,82                | 29,81             |
| 7,0         | 15,10        | 16,54                | 9,54              | 14,76        | 17,53                | 18,77             | 16,46        | 17,93                | 8,93              | 15,88        | 17,69                | 11,40             | 13,42        | 12,10                | 9,84              |
| 9,0         | 13,32        | 12,61                | 5,33              | 13,16        | 13,91                | 5,70              | 14,09        | 12,19                | 13,48             | 13,37        | 12,65                | 5,39              | 12,17        | 14,30                | 17,50             |
| 11,0        | 11,93        | 12,22                | 2,43              | 11,92        | 13,73                | 15,18             | 12,37        | 9,62                 | 22,23             | 11,81        | 10,90                | 7,71              | 11,19        | 13,51                | 20,73             |
| 14,0        | 10,96        | 10,17                | 7,21              | 10,97        | 10,11                | 7,84              | 11,03        | 10,62                | 7,89              | 10,71        | 10,08                | 5,88              | 10,38        | 11,11                | 7,03              |
| 18,0        | 10,62        | 11,37                | 7,06              | 10,71        | 10,45                | 2,42              | 10,60        | 12,11                | 14,25             | 10,45        | 11,40                | 9,09              | 10,21        | 6,58                 | 35,55             |
| 24,0        | 10,07        | 9,15                 | 9,14              | 10,15        | 11,71                | 15,37             | 10,01        | 8,16                 | 18,48             | 9,83         | 10,15                | 3,26              | 9,65         | 10,75                | 11,40             |
| 30,0        | 9,25         | 9,13                 | 1,30              | 9,35         | 11,36                | 21,50             | 9,18         | 7,33                 | 20,15             | 9,00         | 9,51                 | 5,67              | 8,81         | 9,93                 | 12,71             |
| 44,0        | 9,28         | 8,57                 | 7,65              | 9,54         | 11,15                | 16,88             | 9,19         | 5,65                 | 38,15             | 9,05         | 6,94                 | 23,31             | 8,83         | 10,81                | 22,42             |
| 53,0        | 9,36         | 8,32                 | 11,11             | 9,46         | 10,20                | 7,82              | 9,25         | 7,15                 | 22,70             | 9,15         | 9,90                 | 8,20              | 8,91         | 9,47                 | 6,29              |

| Causa da variação | G.L. | Q.M.    | F          |
|-------------------|------|---------|------------|
| regressão         | 1    | 9,37675 | 15141,1*** |
| resíduo           | 73   | 0,00062 |            |
| total             | 74   |         |            |

coeficiente de correlação:  $r = 0,998^{***}$

coeficientes da reta:  $a = -0,021$

$b = 1,0247$

equação da reta:  $U_{\text{grav.}} = -0,0121 + 1,0247 U$

..... (60)

Os pontos experimentais e a reta obtida através da regressão são ilustrados na Figura 16.

Como pode ser observado pelos resultados apresentados, a metodologia desenvolvida mostrou-se adequada para a determinação de gradientes de umidade em madeira. Por ser rápido e não-destrutivo, o método permite conhecer-se a variação dos gradientes numa mesma amostra durante um processo de adsorção ou desorção de umidade. Assim, constitui-se de boa aplicabilidade em estudos de difusão e fluxo de água em madeira. Apesar de, no presente trabalho, as amostras utilizadas não terem apresentado, após secas em estufa a  $105^{\circ}\text{C}$ , variabilidade de densidade ao longo da direção longitudinal, esta metodologia pode ter sua aplicação estendida a estudos nos quais o movimento de umidade se dê nas direções radial ou tangencial, quando a variabilidade de densidade é significativa. Nestes casos, basta que esta variabilidade seja conhecida "a priori".

O método, além de ter apresentado sensibilidade em um gran-

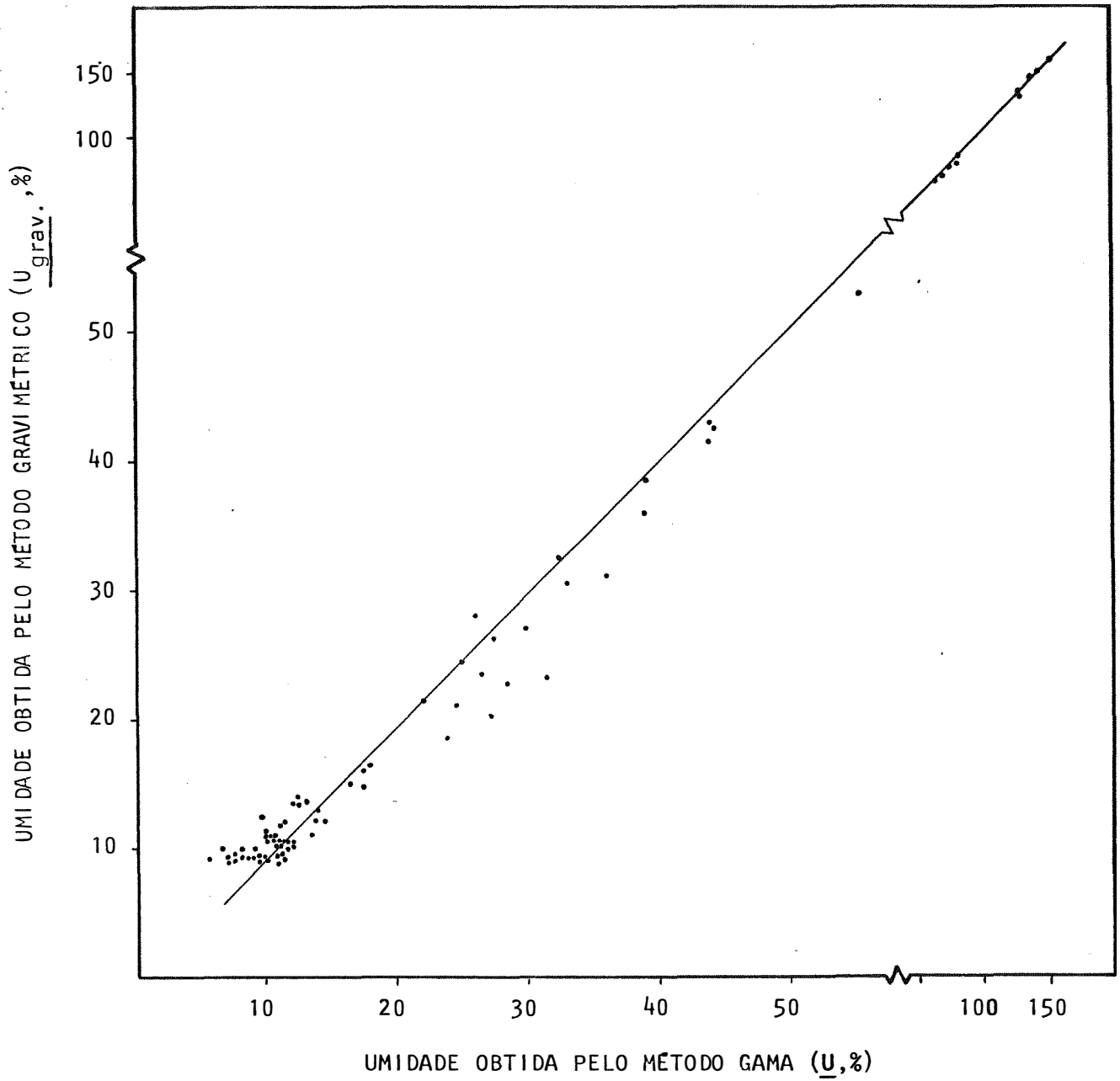


Figura 16 - Correlação entre as umidades de madeira obtidas pelos métodos gama ( $U, \%$ ) e gravimétrico ( $U_{grav.}, \%$ )



de intervalo de umidade (9,0% a 150%) pode detectar diferença de umidade entre dois pontos distanciados de até, no mínimo, 1 mm, desde que se trabalhe com feixe mais estreito de radiação  $\gamma$ .

Já a boa exatidão do método ficou caracterizada através da Tabela 11 e Figura 16. Como se nota, foi encontrada uma correlação altamente significativa entre os valores obtidos pelo método em discussão e os valores obtidos pelo método gravimétrico.

A fim de comparar-se os erros relativos percentuais teóricos ilustrados na Figura 3, com os experimentais apresentados na Tabela 11, foi feita uma análise de correlação linear, obtendo-se:

$$|\delta U|_{\text{teór.}} = 6,78 + 0,18 |\delta U|_{\text{exp.}} \dots\dots\dots (61)$$

$$r = 0,602***$$

Assim, conclui-se que os erros previstos teoricamente estão em excelente concordância com os erros obtidos experimentalmente.

O fato de os erros experimentais terem, em média, superado os teóricos, é justificável, pois estes foram determinados considerando-se apenas a imprecisão das medidas de  $I_0$  e  $I$ , em decorrência da aleatoriedade da desintegração radioativa. No entanto, as contribuições dos erros das medidas das outras grandezas podem não ser desprezíveis, como ilustrado na Tabela 12. Os dados apresentados nesta Tabela são referentes ao teor de umidade  $U = 25,0\%$ .

Tabela 12 - Erros das medidas envolvidas na determinação da umidade da madeira pelo método gama

| y                | $\Delta^*y$                             | $\left  \frac{\partial f}{\partial y} \right   \Delta^*y $ | $\frac{\left  \frac{\partial f}{\partial y} \right   \Delta^*y }{\frac{6}{\sum_{i=1}^6 \left  \frac{\partial f}{\partial y_i} \right   \Delta^*y_i }} \times 100$ |      |
|------------------|---|--|---|------|
|                  |   |  | %   | %    |
| $A^{\frac{a}{}}$ | $1,160 \times 10^{-2}$                  | 3,05   |   | 68,5 |
| x                | $2 \times 10^{-3}$ cm                   | $4,04 \times 10^{-2}$                                      |   | 0,9  |
| $d_m$            | $5 \times 10^{-5}$ g/cm <sup>3</sup>    | $1,48 \times 10^{-2}$                                      |   | 0,3  |
| $d_a$            | $7,37 \times 10^{-3}$ g/cm <sup>3</sup> | $1,98 \times 10^{-1}$                                      |   | 4,5  |
| $\mu_m$          | $2 \times 10^{-3}$ cm <sup>2</sup> /g   | 1,04   |   | 23,3 |
| $\mu_a$          | $8 \times 10^{-4}$ cm <sup>2</sup> /g   | $1,12 \times 10^{-1}$                                      |   | 2,5  |

$$\frac{a}{A} = \ln (I_0/I)$$

---

## 7. CONCLUSÕES

---

Do presente trabalho, pode-se concluir que:

1. A metodologia desenvolvida para a determinação de gradientes de umidade em madeira, além de rápida e não-destrutiva, mostrou-se sensível e de boa exatidão, na faixa de umidade de 9 a 150%. Esta metodologia pode, no entanto, ser aprimorada, tendo em vista a obtenção de distribuições mais contínuas de umidade. Para tal, faz-se necessário compatibilizar uma alta taxa de contagem com um feixe mais estreito de radiação  $\gamma$ .

2. Esta mesma metodologia apresentou erros da ordem de 4% para umidades médias da madeira acima do ponto de saturação de fibra, enquanto que, abaixo deste ponto, os erros obtidos foram da ordem de 10%. Assim, esta metodologia apresenta-se promissora para ser utilizada em estudos de dessorção e adsorção de umidade pela madeira, quer na direção longitudinal, quer nas direções radial e tangencial.

3. A metodologia desenvolvida para a determinação da dependência entre a densidade da água adsorvida na madeira e a umidade da madeira mostrou-se sensível e precisa. Observou-se que, no intervalo de umidade estudado (de 5 a 25%) a densidade da água cresce com a diminuição de umidade, atingindo valor de até  $1,153 \text{ g/cm}^3$ .

4. O valor obtido experimentalmente para o ponto de saturação de fibra de madeira de *Pinus oocarpa* mostrou-se em acorco com os valores encontrados na literatura para os coníferas em geral.

5. O método de serragem utilizado na determinação dos coeficientes de atenuação de massa das espécies de madeira utilizadas apresentou boa precisão. Os coeficientes de atenuação de massa teóricos determinados para água e madeira foram superiores aos experimentais obtidos, em concordância com o previsto pela literatura.

---

## 8. SUMMARY

---

---

A new methodology for determining water content gradients in wood was developed. It was based on the low energy gamma ray attenuation. Two equations were proposed for determining wood water content, below and above the fiber saturation point. The errors involved in wood water content determination were theoretically estimated and the method was compared with gravimetric method.

A new procedure was described for determining the relationship between the density of adsorbed water in wood and the wood water content. It was noted that the density of adsorbed water increases up to  $1.153 \text{ g/cm}^3$  by decreasing the wood water content from 25% to 5%. The water content gradients determination was quick, non-destructive and presented sensitivity and accuracy in water content range from 9% to 150%. The experimental errors obtained were approximately 4% for water contents above the fiber saturation point and 10% for water contents below this point.

---

## 9. LITERATURA CITADA

---

---

BARRICHELO, L.E.G. - 1979a. *Celulose kraft de madeiras de pinheiros tropicais para fabricação de papel*. Piracicaba, Departamento de Silvicultura da ESALQ/USP. 39p. (Boletim Informativo nº 5).

BARRICHELO, L.E.G. - 1979b. Estudo das características físicas, anatômicas e químicas da madeira de *Pinus caribaea* Mor. var. *hondurensis* Barr. e Golf. para a produção de celulose kraft. Piracicaba, ESALQ/USP, 167p. (Tese de Livre-Docência).

BLACKWELL, J.; F.J. KOLPAK e K.H. GARDNER - 1978. The structures of celluloses I and II. *Tappi*. Atlanta, 61: 71-72.

BRAMHALL, G. - 1976. Fick's laws and bound-water diffusion. *Wood Science*. Madison, 8: 153-161.

BRAMHALL, G. - 1979. Mathematical model for lumber drying. *Wood Science*.

Madison, 12: 22-31.

CHOONG, E.T.; J.F.G. MACKAY e C.M. STEWART - 1973. Collapse and moisture flow in kiln-drying and freeze-drying of woods. *Wood Science*.

Madison, 6: 127-135.

FERRAZ, E.S.B. - 1974. Determinação simultânea de densidade e umidade de solos por atenuação de raios gama do  $^{137}\text{C}$  e  $^{241}\text{Am}$ . Piracicaba, ESALQ/USP. 120p. (Tese de Livre-Docência).

FERRAZ, E.S.B. - 1975. A sensibilidade do método  $2\gamma$  de medida simultânea de densidade e umidade de solos. *In: Anais do XV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, Campinas, p. 43-49.

FERRAZ, E.S.B. - 1976. Determinação da densidade de madeiras por atenuação de radiação gama de baixa energia. *IPEF*, Piracicaba, 12: 61-68.

FERRAZ, E.S.B. e R.S. MANSELL - 1979. *Determining water content and bulk density of soil by gamma-ray attenuation methods*. Gainesville University of Florida. 51p. (Technical Bulletin nº 807).

GALVÃO, A.P.M. - 1972. Factors influencing the flow of oil into coniferous woods. Syracuse, State University College of Forestry at Syracuse University, 94p. (M.S. Thesis).

GARDNER, W.H.; G.S. CAMPBELL e C. CALISSENDORFF - 1972. Systematic and random errors in dual gamma energy soil bulk density and water content

measurements. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* Madison, 36: 393-398.

GARDNER, W.H. e C. CALISSENDORFF - 1967. Gamma-ray and neutron attenuation in the measurement of soil bulk density and water content. In: International Atomic Energy Agency. Symposium on the use of isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. Istanbul, Vienna, p. 101-113.

GILLWALD, W. - 1960. Isotopes in wood research. *Archiv fur Forstwesen.* Eingegangen, 9: 771-788.

GOPAL, S. e B. SANJEEVAIAH - 1973. Gamma-ray attenuation coefficient measurements. *Physical Review.* New York, 8: 2814-2818.

GORING, D.A.I. - 1966. The structure of water in relation to the properties of wood constituents. *Pulp and Paper Magazine of Canada.* Gardenvale, 5: 519-524.

GROENEVELT, P.H.; J.G. SWART e J. CISLER - 1969. Water content measurement with 60 keV gamma-ray attenuation. *Bulletin of the International Association of Scientific Hidrology.* (s.l.), 14: 67-78.

HARRIS, J. - 1969. The use of beta rays in determining wood properties. *New Zealand Journal of Science.* Wellington, 12: 394-451.

HART, C.A. - 1964. Principles of moisture movement in wood. *Forest Products Journal.* Madison, 14: 207-214.



HART, C.A. e W.M. DARWIN - 1971. The slow drying rate of white oak. *Wood Science*. Madison, 4: 46-54.

JANKOWSKY, I.P. - 1979. Influência da densidade básica e do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira. Piracicaba, ESALQ/USP, 94p. (Dissertação de Mestrado).

JAYNE, B.A. - 1959. Vibrational properties of wood. *Forest Products Journal*. Madison, 9: 413-416.

KAWAI, S.; K. NAKATO e T. SADOH - 1978. Moisture movement in wood below the fiber saturation point. *Mokuzai Gakkaishi*. Kyoto, 24: 273-280.

KLEUTERS, W. - 1964. Optimal test conditions for determining local density of wood by the beta-ray method. *Forest Products Journal*. Madison, 14: 414-420.

KOLLMANN, F.F.P. e W.A. CÔTÉ JR. - 1968. *Principles of wood science and technology*. New York, Springer-Verlag. V. 1.

LEE, C.L. - 1961. Crystallinity of wood cellulose fibers studied by X-ray methods. *Forest Products Journal*. Madison, 3 : 108-112.

LOOS, W.W. - 1961. The relationship between gamma-ray absorption and wood moisture content and density. *Forest Products Journal*. Madison, 11: 145-149.

- LOOS, W.E. - 1965. Determining moisture content and density of wood by nuclear radiation techniques. *Forest Products Journal*. Madison, 15: 102-106.
- MacLEAN, J.D. - 1952. *Preservative treatments of wood by pressure methods*. Beltsville, USDA. 528p. (Agriculture Handbook n° 40).
- MAGNUSSON, L.B. - 1957. Intensivities of X-rays and  $\gamma$ -rays in  $^{241}\text{Am}$  alpha decay. *Physical Review*. New York, 107: 161-170.
- MILLER, D.G. - 1955. *Americium-241 as a photon source for the gamma absorptometric technique*. 10 ed. Washington, D.C., United States Atomic Energy Commission. 16p. (TID-4500).
- MOSLEMI, A.A. - 1968. A study of moisture content gradients in wood by vibrational techniques. *Wood Science*. Madison, 1: 77-85.
- NANASSY, A.J. - 1973. Use of wide line NMR for measurement of moisture content in wood. *Wood Science*. Madison, 5:187-193.
- NANASSY, A.J. - 1978. Temperature dependence of NMR measurement on moisture in wood. *Wood Science*. Madison, 11: 86-90.
- PARRISH, W.B. - 1961. Detecting defects in wood by the attenuation of gamma rays. *Forest Science*. Washington, D.C., 7: 136-143.
- PINTO, F.A. - 1978. Determinação de densidade de madeira por atenuação

de radiação  $\gamma$  do  $^{241}\text{Am}$ . Piracicaba, ESALQ/USP. 129p. (Dissertação de Mestrado).

PISKUNOV, N. - 1955. *Cálculo Diferencial e Integral*. São Paulo, Edições Cardoso. 967p.

POLGE, H. e J.W.P. NICHOLLS - 1972. Quantitative radiography and the densitometric analysis of wood. *Forest Products Journal*. Madison, 5: 51-59.

RESCH, H. e B.A. ECKLUND - 1963. Moisture content determination for wood with highly volatile constituents. *Forest Products Journal*. Madison, 13: 481-482.

SIAU, J.F. - 1970. *Flow in wood*. Syracuse, Syracuse University Press. 131p.

SKAAR, C. - 1964. Some factors involved in the electrical determination of moisture gradients in wood. *Forest Products Journal*. Madison, 14: 239-243.

SKAAR, C. - 1972. *Water in wood*. Syracuse, Syracuse University Press. 218p.

SKAAR, C. e W. SIMPSON - 1968. Thermodynamics of water sorption by wood. *Forest Products Journal*. Madison, 18: 49-58.

- STAMM, A.J. - 1964. *Wood and cellulose science*. New York, Ronald Press Co. 269p.
- STAMM, A.J. - 1971. Review of nine methods for determining the fiber saturation points of wood and wood products. *Wood Science*. Madison, 4: 114-128.
- WANG, C.H.; D.L. WILLIS e W.D. LOVELAND - 1975. *Radiotracer methodology in the biological environmental and physical sciences*. New Jersey, Prentice-Hall. 480p.
- WANGAARD, F.F. - 1969. Cell-wall density of wood with particular reference to the southern pines. *Wood Science*. Madison, 1: 222-226.
- WATT, J.S. e K.R. LAWTHORP - 1958. Measurement of concentration of tungsten suspensions and density of liquid sodium by gamma ray absorption. In: Australian Atomic Energy Commission. Symposium on the peaceful uses of atomic energy in Australia, Canberra, p. 610-614.
- WEATHERWAX, R.C. e H. TARKOW - 1968. Density of wood substance: importance of penetration and adsorption compression of the displacement fluid. *Forest Products Journal*. Madison, 18: 44-46.
- WILEY, A.T. e E.T. CHOONG - 1975. An analysis of free-water flow during drying in softwoods. *Wood Science*. Madison, 7: 310-318.
- WILFONG, J.G. - 1966. Specific gravity of wood substance. *Forest*

*Products Journal*. Madison, 16: 55-61.

WOODS, F.W. e W.T. LAWHON - 1974. Gamma densitometry of increment cores.

*Forest Science*. Washington, D.C., 20:269-271.

YANNOS, P.N. - 1964. The apparent cell-wall density of wood and pulp

fibers. *Tappi*. Atlanta, 47:468-471.