

INFLUÊNCIA DA DENSIDADE BÁSICA E DO TEOR DE EXTRATIVOS NA UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA.

IVALDO PONTES JANKOWSKY

ANTONIO PAULO MENDES GALVÃO
— ORIENTADOR —

Dissertação apresentada à Escola
Superior de Agricultura "Luiz de
Queiroz", da Universidade de São
Paulo, para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Florestal.

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Abril - 1979

Aos meus pais,

e à minha esposa

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. A. Paulo M. Galvão, orientador e amigo, pelo estímulo e apoio na realização deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Helládio do Amaral Mello, pela oportunidade e incentivo constante;

Ao Prof. Dr. Hilton Tadeu Zarate do Couto e ao Prof. Dr. Humberto de Campos, pelo auxílio nas análises estatísticas;

Ao Prof. Dr. Luiz Ernesto George Barrichelo, pelas sugestões e auxílio prestado;

Ao Dr. Calvino Mainieri, pela identificação das madeiras utilizadas neste trabalho;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão de uma bolsa de estudos;

Aos colegas do Departamento de Silvicultura da ESALQ/USP e do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, que direta ou indiretamente colaboraram para a concretização deste trabalho;

Aos funcionários do Departamento de Silvicultura da ESALQ/USP, especialmente ao Auxiliar Técnico Carlos Alberto de Moura, pela colaboração durante o desenvolvimento deste trabalho;

À todos que conosco colaboraram, e que tiveram
seus nomes aqui omitidos;

NOSSOS SINCEROS AGRADECIMENTOS.

ÍNDICE

	<u>página</u>
1. RESUMO	1
2. INTRODUÇÃO	3
3. REVISÃO DE LITERATURA	5
3.1. A relação entre a madeira e a água do meio ambiente	5
3.2. A teoria de Hailwood e Horrobin	7
3.3. Efeito da composição química na higroscopicidade e em outras características da madeira ..	11
3.4. Interações da densidade básica com a higroscopicidade e com a composição química da madeira	15
4. MATERIAL E MÉTODOS	18
4.1. Material	18
4.2. Métodos	19
4.2.1. Amostragem	19
4.2.2. Procedimento experimental	19
4.2.3. Estudo teórico da adsorção	22
4.2.4. Análise estatística	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
6. CONCLUSÕES	85
7. SUMMARY	88
8. LITERATURA CITADA	90

1. RESUMO

Este trabalho teve como objetivo verificar a influência da densidade básica e do teor de extrativos na umidade de equilíbrio em madeira de Pinho (Araucaria angustifolia (Bert.) O.Ktze.), de mogno (Swietenia macrophylla King), e de eucalipto (Eucalyptus citriodora Hook).

O teor de extrativos solúveis em água e solúveis em álcool-benzeno, a densidade básica, e as umidades de equilíbrio correspondentes às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C e umidades relativas de 40%, 60% e 79% foram determinadas para amostras das três espécies. Os dados obtidos foram então analisados através da regressão linear e da teoria da adsorção de Hailwood e Horrobin, descrita por SKAAR (1972).

As principais conclusões do presente estudo são:

1. Um acréscimo do teor de extrativos ocasionou um decréscimo da umidade de equilíbrio nas três espécies estudadas.

2. O efeito dos extrativos acentuou-se com o aumento da umidade relativa, porém não se alterou com mudanças da temperatura.

3. Quantitativamente a redução da umidade de equilíbrio provocada pelos extrativos solúveis em água é igual à ocasionada pelos extrativos solúveis em álcool-benzeno.

4. A densidade básica não alterou a umidade de equilíbrio para as três espécies estudadas. A influência da densidade básica é um reflexo de sua correlação com o teor de extrativos.

5. A atuação dos extrativos como material de enchimento, reduziu a adsorção monomolecular e polimolecular de umidade.

2. INTRODUÇÃO

A madeira é um material altamente higroscópico, podendo ceder ou retirar água do meio ambiente em função da umidade relativa e da temperatura do ar que a envolve, e do seu próprio teor de umidade. Essa troca de água entre a madeira e o meio ambiente é de suma importância; pois esse fenômeno provoca uma variação nas dimensões da madeira e altera suas características físico-mecânicas, representando um obstáculo contínuo para o uso eficiente desse material.

Quando exposta às condições de temperatura e umidade relativa constantes, a tendência da umidade na madeira é atingir um ponto de equilíbrio com as condições ambientais. Embora a temperatura e a umidade relativa sejam os principais fatores que condicionam a umidade de equilíbrio, sabe-se que existem outros fatores como a densidade básica e a composição química (teores de holocelulose, lignina e extrativos) atuando no fenômeno de adsorção d'água.

As informações de literatura sobre a correlação da umidade de equilíbrio com o teor de extrativos e a densidade básica são esparsas e às vezes contraditórias. A deposição dos extrativos pode ocorrer nos espaços intra e inter-

celulares, na superfície e no interior da parede celular, ocasionando um aumento no peso seco da madeira e diminuindo a disponibilidade de locais para a fixação das moléculas d'água. A adsorção da umidade do ar pela madeira ocorre quase que exclusivamente na parede celular, cuja espessura correlaciona-se positivamente com a densidade básica.

Entender e definir a inter-relação entre a umidade de equilíbrio com a temperatura, com a umidade relativa, e com as características do material lenhoso é importante em muitas fases do processamento da madeira, como a secagem racional, a obtenção de boas juntas de colagem e a aplicação de revestimentos, e também para o seu uso final, de modo a minimizar os problemas relacionados com a instabilidade dimensional.

O presente trabalho tem por objetivo estudar o correlacionamento entre os fatores intrínsecos do material lenhoso e a variação do seu teor de umidade, determinando, experimentalmente, a influência do teor de extrativos e da densidade básica da madeira na umidade de equilíbrio, em função de variações da temperatura e da umidade relativa.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. A relação entre a madeira e a água do meio ambiente.

A madeira, na dependência da umidade relativa, da temperatura e do seu próprio teor de umidade, pode retirar ou ceder água ao meio ambiente. Define-se a adsorção quando a madeira retira umidade do ar, e dessorção quando ela cede umidade ao ar. Sob condições de temperatura e umidade relativa constantes a umidade da madeira tende a atingir um teor em que ocorre o equilíbrio com a umidade relativa da atmosfera. Nesse ponto, em que cessa a troca de água com o meio ambiente, a madeira atingiu a umidade de equilíbrio.

A importância da umidade de equilíbrio da madeira quando em uso tem sido discutida por diversos autores, entre eles PECK(1965), ORMAN(1966), KOLLMANN e CÔTÊ (1968). A secagem em secadores ou estufas, onde se pode ter um controle melhor sobre a umidade de equilíbrio visada, é etapa obrigatória quando se deseja obter produtos da madeira com qualidade superior. Para se controlar ao máximo as variações dimensionais, a madeira deve ter seu teor de umidade reduzido a um valor intermediário entre a maior e menor umidade que ela irá

atingir em uso. Defeitos comuns em produtos manufaturados da madeira, como rachaduras, empenamentos e aberturas de juntas, podem ser evitados através da secagem controlada do material lenhoso, antes de sua utilização, ao teor médio da umidade que será atingida em uso.

De acôrdo com STAMM (1964), acredita-se que a água entra livremente nas regiões amorfas da celulose, onde é adsorvida pelos grupos hidroxilos disponiveis. Na região cristalina a água é adsorvida somente na superfície, devido a sua inabilidade em penetrar o entrelaçamento de cristais das moléculas cristalinas de celulose.

Segundo KOLLMANN e CÔTÊ (1968), o fenômeno de adsorção e dessorção da água pela madeira é influenciado por uma série de propriedades físicas e químicas. Muito provavelmente a afinidade e o tamanho da superfície interna de adsorção contribuem para essa relação entre a madeira e a água do meio ambiente.

Considerações sobre o que ocorre quando utilizam-se amostras de grandes dimensões (pode ocorrer também com tábuas e peças similares durante uma secagem industrial) são feitas por STAMM (1964), segundo o qual, pode aparecer uma curva intermediária entre a adsorção e a dessorção devido ao fato de ocorrerem as duas formas de troca de umidade ao mesmo tempo. O aparecimento de um apreciavel gradiente de umidade na amostra pode fazer com que a umidade dessorvida na parte central seja adsorvida na superfície. O referido autor relata que um coeficiente de histerese igual a $0,82 \pm 0,01$ pode ser usado com razoavel confiabilidade para calculos aproximados.

SKAAR (1972), define o coeficiente de histerese como a razão entre a umidade de equilibrio atingida segun-

do uma adsorção e aquela alcançada pela dessorção, para uma dada umidade relativa. Quando se considera o ciclo completo adsorção-dessorção, o coeficiente de histerese varia de 0,8 a 0,9, dependendo tanto da madeira como da temperatura.

STAMM e LOUGHBOROUGH(1935), consideram que durante a primeira secagem um numero de grupos hidroxilos, que antes estavam plenamente satisfeitos pela água adsorvida, perdem água e com a contração correspondente ocorre um fechamento, suficiente em alguns casos para aproximar esses grupos de modo que êles se satisfazem mutuamente. Numa posterior adsorção de água, esses grupos hidroxilos mutuamente satisfeitos não estão disponíveis para a fixação das moléculas de água, resultando na diminuição do teor de água adsorvida. Existe ainda o fato de que a rehidratação nunca é tão completa quanto à hidratação original.

Segundo SPALT(1958), a histerese pode ser descrita como uma série de equilíbrios atingidos pelo "gel" (celulose ou glucose anidra) em um caso, partindo de um estado relativamente disperso (dessorção), e no outro, a partir de um estado relativamente compacto (adsorção).

3.2. A teoria de Hailwood e Horrobin.

A adsorção de água pela madeira pode ser explicada através da teoria de Hailwood e Horrobin, que é discutida em detalhes por SPALT(1958), WANGAARD e GRANADOS(1967), e SKAAR(1972).

O modelo desenvolvido por Hailwood e Horrobin propõe que durante a adsorção/dessorção do vapor d'água por um sistema de polímeros, como a madeira, são formados um hi-

drato e uma solução sólida. O hidrato representa a água adsorvida monomolecularmente na superfície da região cristalina e a solução resultaria da água adsorvida nas regiões amorfas, que é fixada polimolecularmente e forma uma solução com a madeira.

SPALT (1958), definiu a água de fixação polimolecular, ou a água da solução, não como água fixada na madeira mas sim como água que se condensava nos espaços vazios que existiriam dentro da parede celular. Essa definição foi contrariada por STAMM (1964), que mostra a existencia da condensação da água em capilares dentro da parede celular apenas quando a pressão relativa de vapor estiver ao redor de 0,995 (correspondente a uma umidade relativa de 99,5%). Admitindo - se que ocorra a condensação capilar em uma faixa de pressão relativa de vapor entre 0,900 e 0,995, ela não excederá a 20% do volume total da parede celular.

A teoria assume que a água dissolvida, o polímero hidratado e o polímero não hidratado formam uma solução sólida ideal, existindo um equilíbrio entre suas respectivas atividades. As moléculas de água na fase sólida são móveis, havendo um equilíbrio entre a água dissolvida e a umidade relativa, e entre a água dissolvida e a água na forma de hidrato. Assim, a equação que representa a isoterma será:

$$\frac{M(UE)}{1800} = \frac{K_2h}{(1 - K_2h)} + \frac{K_1K_2h}{(1 + K_1K_2h)} \quad (1)$$

onde M é igual ao peso molecular do polímero necessário para associar-se com um peso molecular de água, UE é a umidade de equilíbrio (expressa em porcentagem) a uma dada umidade rela-

tiva h (expressa em decimal), K_1 é a constante de equilíbrio do hidrato e K_2 é a constante de equilíbrio da solução sólida.

Isolando-se o valor de UE na equação 1, teremos:

$$UE = \frac{1800}{M} \left[\frac{K_2 h}{(1 - K_2 h)} + \frac{K_1 K_2 h}{(1 + K_1 K_2 h)} \right] \quad (2)$$

equação essa que permite calcular o teor de umidade da madeira, uma vez conhecidos os valores de K_1 , K_2 e M .

A uma temperatura constante, a relação entre a umidade relativa e a umidade de equilíbrio da madeira resulta em uma curva sigmóide bastante conhecida. Porém, a relação entre a umidade relativa (H) e a razão umidade relativa (H) / umidade de equilíbrio (UE), expressas em porcentagem, resulta em uma curva quadrática com a seguinte equação geral:

$$\frac{H}{UE} = A + B(H) - C(H)^2 \quad (3)$$

Da igualdade entre a equação 3 e a equação 1, transformada para a forma quadrática colocando-se em evidência a razão h/UE , pode-se obter:

$$K_2 = \frac{\left[2 + \frac{B^2}{AC} \right] \pm \sqrt{\left[2 + \frac{B^2}{AC} \right]^2 - 4}}{2} \quad (4)$$

$$K_1 = \frac{100 B}{A(K_2 - 1)} \quad (5)$$

$$M = 1800 B \frac{(K_2 + 1)}{(K_2 - 1)} \quad (6)$$

Assim, conhecendo-se os valores da umidade relativa e da umidade de equilíbrio para uma temperatura qualquer, é fácil determinar os valores de K_1 , K_2 e M , que permitirão representar graficamente a isoterma.

A equação 2 pode ainda ser escrita na seguinte forma:

$$UE = \frac{1800}{M} \left[\frac{K_2 h}{(1 - K_2 h)} \right] + \frac{1800}{M} \left[\frac{K_1 K_2 h}{(1 + K_1 K_2 h)} \right] \quad (7)$$

onde o primeiro termo da direita representa U_s , o teor de umidade em porcentagem que constitui a água da solução ou água fixada polimolecularmente. O segundo termo da direita equivale a U_h , o teor de umidade em porcentagem da água na forma de hidrato ou fixada monomolecularmente.

SPALT(1958), analisando a adsorção/dessorção de água pela madeira, considera que se todas as moléculas de celulose (glucose anidra) fossem ativas na adsorção/dessorção, o valor calculado para M seria de 162. Sendo que raramente isso ocorre, o valor encontrado para M sempre é maior, o que permite estimar a porcentagem de moléculas de celulose inativas, ou a porcentagem de inacessibilidade, pela seguinte equação:

$$I\% = \frac{100 (M - 162)}{M} \quad (8)$$

SIMPSON(1971), baseando-se na teoria de Hailwood e Horrobin e nos resultados experimentais obtidos pelo Forest Products Laboratory com madeira de Sitka Spruce (Picea sitchensis), determinou equações do segundo grau que permitem estimar os valores de K_1 , K_2 e M a partir da temperatura. O desvio máximo encontrado pelo autor entre a umidade de equilíbrio calculada matematicamente e a determinada experimental-

mente foi de 0,90%.

GALVÃO (1975), estimou a umidade de equilíbrio teórica para diversas cidades do Brasil, através das tabelas do Forest Products Laboratory e da equação de Simpson, encontrando uma diferença máxima de 0,4% entre as umidades calculadas pelos dois métodos.

Diversos modelos teóricos sobre a adsorção/dessorção de água pela madeira foram testados por SIMPSON(1973), através da representação gráfica do modelo com auxílio de dados experimentais existentes na literatura; tendo o autor concluído que o modelo proposto por Hailwood e Horrobin é o mais acurado quando a umidade de equilíbrio é calculada como uma função da umidade relativa.

Deve-se ressaltar porém, que os dados do FOREST PRODUCTS LABORATORY (1955), utilizados por SIMPSON(1971), representam a umidade de equilíbrio (para uma determinada temperatura e umidade relativa) intermediária entre a adsorção e a dessorção e, portanto, a isoterma obtida pela equação de Simpson ou através das tabelas do Forest Products Laboratory estará situada entre os dois extremos das curvas de adsorção e dessorção, não considerando o efeito da histerese.

3.3. Efeito da composição química na higroscopicidade e em outras características da madeira.

A composição química é outro fator que altera a higroscopicidade da madeira. SKAAR(1972), reportando resultados obtidos por Christensen e Kelsey, estimou que a celulose contribui com 47,0% da capacidade total da madeira trocar água com o ar, as hemiceluloses com 37,0%, e a lignina com

16,0%. O autor ressalta, porem, que as curvas de adsorção dos constituintes quando isolados não representam a atuação dos mesmos na madeira bruta, e que a capacidade adsortiva da madeira não corresponde à somatória de seus constituintes, devido aos efeitos provenientes das técnicas usadas na separação e extração dos compostos e também devido às possíveis inter-relações entre constituintes quando na madeira.

BUCHANAN(1963), informa haver uma consideravel variação na distribuição dos extrativos através da madeira de uma dada árvore. Açucares e outros constituintes da seiva, e as substâncias de reservas como graxas e amidos, são encontradas no alburno. Materiais fenólicos contudo, são usualmente depositados no cerne. Existe uma variação na quantidade de material depositado através da altura da árvore e entre o tronco e os galhos.

Existe também uma variação dentro da fina estrutura da madeira. As graxas são encontradas nas células parenquimatosas, especialmente do raio, ao passo que ácidos resinosos são secretados pelas células epiteliais e tendem a encher os canais resiníferos. Alguns materiais aparentam estar depositados nos poros de certas folhosas. Os constituintes da seiva estão presentes no alburno da árvore viva e são depositados dentro dos capilares da madeira, e nas superfícies da madeira quando esta é secada.

De acordo com BROWNING(1967), a extração com solventes orgânicos (éter, acetona, etanol, benzeno, e alcool benzeno) retira da madeira, resina, ácidos graxos, seus esteres, ceras, substâncias insaponificaveis e materias corantes. A extração em água retira sais inorgânicos, açucares, polissacarideos, e algumas substâncias fenólicas. Alguns dos materi-

is solúveis em água são mais ou menos solúveis em solventes orgânicos. Conseqüentemente, o extrato solúvel em solventes orgânicos pode conter uma fração que é também solúvel em água.

As inter-relações entre composição química, densidade básica, adsorção/dessorção de umidade, e retração volumétrica têm sido objetivo de estudo por parte de diversos autores.

NEARN(1955) verificou que devido à ação de enchimento dos extrativos solúveis em água, espécies com alto teor de extrativos apresentam maior estabilidade dimensional, menos umidade no ponto de saturação das fibras e umidades de equilíbrio mais baixas do que espécies que possuam pequenas quantidades de extrativos em sua composição química. O autor considera que esses componentes ocupam uma parte do espaço da parede celular que normalmente seria ocupado pela água. Verificou também o autor que a extração em água quente provocava um aumento na umidade de equilíbrio quando a umidade relativa era de 60,0% ou mais, sendo que esse efeito não se verificou quando a umidade relativa foi de 40,0% e 20,0%.

De acordo com SPALT(1958), o efeito da presença de extrativos na madeira é mais acentuado na adsorção polimolecular do que na adsorção monomolecular de umidade; como também exerce uma influência marcante na histerese.

Os resultados obtidos por WANGAARD e GRANADOS (1967), não só confirmam as observações de NEARN(1955) e SPALT (1958), como também mostram que de um modo geral, os extrativos solúveis em solventes neutros são ligeiramente mais higroscópicos em termos de adsorção/dessorção monomolecular do que a parede celular estrutural.

CHOONG(1969), trabalhando com dez espécies de pinheiros da região sul dos Estados Unidos, sugere que os extrativos solúveis em água encontram-se na sua totalidade dentro da parede celular, o que explica a influência na higroscopicidade, e na estabilidade dimensional da madeira. Por sua vez os extrativos insolúveis em água estão em boa parte confinados nos capilares grossos afetando o peso específico da madeira, e sua remoção afeta a higroscopicidade meramente diminuindo o peso inerte da substância madeira.

Segundo MEYER e BARTON(1971), a ocorrência de colapso durante a secagem da madeira de Thuja plicata está relacionada com o conteúdo de extrativos, embora não seja possível fazer uma afirmação definitiva a respeito do mecanismo de atuação dos extrativos na indução ao colapso. Existe também a importância de altos teores de umidade inicial na formação do colapso, o que indica que tanto os extrativos como a umidade inicial devem ser considerados na avaliação da suscetibilidade da madeira ao colapso.

Os resultados obtidos por TAYLOR(1974), mostram que a retirada dos extrativos provoca um aumento no volume de blocos de madeira, suficiente para causar um decréscimo de 0,02 no peso específico aparente. O autor acredita que o aumento no volume é devido à expansão da substância madeira, causada pelas moléculas de água que ocupam locais de adsorção/dessorção de onde foram retirados os extrativos.

DEMAREE e ERICKSON(1976), pesquisando a correlação entre extrativos e retração volumétrica em madeira de Sequoia sempervirens, chegaram à conclusão que existe uma interação com a temperatura utilizada durante a secagem. À temperatura ambiente e a 43,3°C, o teor de extrativos solúveis

em água está inversamente relacionado com a retração volumétrica, ao passo que para temperaturas entre 54,4°C e 87,8 °C as duas variáveis estão diretamente correlacionadas. Parece que à baixas temperaturas de secagem os extrativos atuam primeiramente como agentes de enchimento, à temperaturas mais altas eles aumentam a plasticidade da parede celular, causando uma maior retração e o colapso durante a perda de água livre. Acredita-se que os taninos sejam responsáveis por esse fenômeno.

3.4. Interações da densidade básica com a higroscopicidade e com a composição química da madeira.

SMITH e MILLER(1964), demonstram que para a madeira de Sequoia sempervirens a densidade básica é altamente correlacionada com a espessura da parede celular, tanto para o lenho inicial como para o tardio, e em árvores de povoamentos jovens ou antigos. Essa correlação é válida independentemente do método de determinação da densidade (máximo teor de umidade ou imersão em água). A possibilidade de se estimar a espessura da parede celular a partir de determinações da densidade básica é discutida por SMITH(1965).

Quanto à interação entre a densidade básica e a umidade de equilíbrio, existem poucas informações a respeito na literatura. YAO(1972), verificou que para madeira de Pinus taeda, a correlação linear entre retração volumétrica e altura da amostra na árvore, bem como entre o ponto de saturação das fibras e a densidade básica não são significativas. A aparente inter-relação entre a densidade básica e o ponto de saturação das fibras é meramente um reflexo das relações em

comum com a altura da amostra na árvore. Mantendo-se a densidade básica constante, a correlação entre retração volumétrica e o ponto de saturação das fibras é significativa. A retração volumétrica depende tanto da densidade básica como também, em um grau menor, do ponto de saturação das fibras; sendo que seus efeitos são aditivos.

Um fato amplamente conhecido é a tendência da densidade básica aumentar com a idade da árvore até que esta atinga a maturidade, a partir do que a densidade mantém-se praticamente constante. É de se esperar, portanto, uma alteração na composição química da madeira em função da idade.

De acordo com MC MILLIN(1968), em Pinus taeda o conteúdo de alfa-celulose varia com mudanças da densidade básica e distância da medula, independentemente do ritmo de crescimento da árvore. O teor de alfa-celulose mostrou-se positivamente relacionado com a densidade básica. As hemiceluloses, entretanto, mostraram-se estar negativamente correlacionadas com a densidade básica; sendo que em geral o conteúdo de holo-celulose não variou com alterações na densidade, no ritmo de crescimento e na distância da medula. Em árvores de rápido crescimento o teor de lignina aumenta com o afastamento da medula, ocorrendo o inverso quando o ritmo de crescimento é lento. O conteúdo de extrativos tende a diminuir com o afastamento da medula, mas na média geral de todos os ritmos de crescimento e distância da medula, ele está positivamente relacionado com a densidade básica.

Para TARAS e SAUCIER(1967), que pesquisaram pinheiros provenientes do sul dos Estados Unidos, a densidade básica da madeira livre de extrativos está diretamente correlacionada com a densidade básica da madeira bruta. Entretanto

VERMAAS(1975), trabalhando com Pinus pinaster não encontrou nenhuma correlação entre a quantidade de extrativos e o peso específico da madeira a 10% de umidade.

De acordo com HIGGINS et alii(1973), as propriedades que acredita-se exercerem a principal influência na densidade básica das folhosas são o diâmetro e a frequência dos elementos do vaso, a relação entre diâmetro da fibra e espessura da parede celular, e o conteúdo e distribuição dos extrativos.

FOELKEL et alii(1975), estudando as características de diversas espécies de Eucalyptus de povoamentos implantados, verificaram que para uma dada espécie com o aumento da idade ocorre um sensível aumento na densidade básica, aumentam os teores de extrativos e a quantidade de lignina, enquanto decrescem os teores de celulose e pentosanas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Material.

Na condução deste experimento foram utilizadas quatro tábuas comerciais de pinho do Paraná (Araucaria angustifolia (Bert.) O.Ktze.), quatro de mogno (Swietenia macrophylla King), e três de eucalipto (Eucalyptus citriodora Hook). A escolha dessas espécies baseou-se no fato de serem o pinho e o mogno amplamente utilizados em carpintaria e marcenaria, e o eucalipto citriodora uma espécie introduzida que vem sendo utilizada em reflorestamentos e apresenta-se potencialmente viável para uso em mobiliário e construção civil.

No desenvolvimento do trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos de laboratório:

- Estufa com circulação forçada de ar e dotada de termostato, com precisão de $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$;
- balança analítica, com precisão de 0,1 mg;
- conjunto de extratores Soxhlet;
- climatizador, com controle de temperatura e umidade relativa (modelo VP-1000 AT, fabrica

- do pela Blue-M Company);
- moinho Wiley, com peneira de 40 "mesh".

4.2. Métodos.

4.2.1. Amostragem.

As onze tábuas utilizadas no experimento foram individualmente divididas em cinco partes iguais. De cada parte foi sorteada, ao acaso, uma amostra com 32,0cm de comprimento (acompanhando a direção das fibras) e 4,0cm de largura, perfazendo um total de cinco amostras por tábua. A espessura das amostras foi então uniformizada em 1,5cm.

A Figura 1 apresenta esquematicamente a amostragem e a destinação das amostras. Da Tabela 1 constam as dimensões das tábuas e a identificação das amostras obtidas.

4.2.2. Procedimento experimental.

As amostras citadas no item 4.2.1. foram divididas em três partes, ficando as laterais com 12,0cm de comprimento, e a central com 8,0cm. As sub-amostras laterais foram transformadas em cavacos, sendo que parte dos cavacos foi utilizada na determinação da densidade básica, através do método da balança hidrostática descrito por FOELKEL et alii (1971). Os cavacos restantes foram transformados em serragem de fração 40 (fração da serragem que atravessa uma peneira de 40 "mesh"), utilizada na determinação da solubilidade em álcool-benzeno e água quente segundo as normas ABCP-M6/68 e ABCP-M4/68 respectivamente, ambas da ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASI

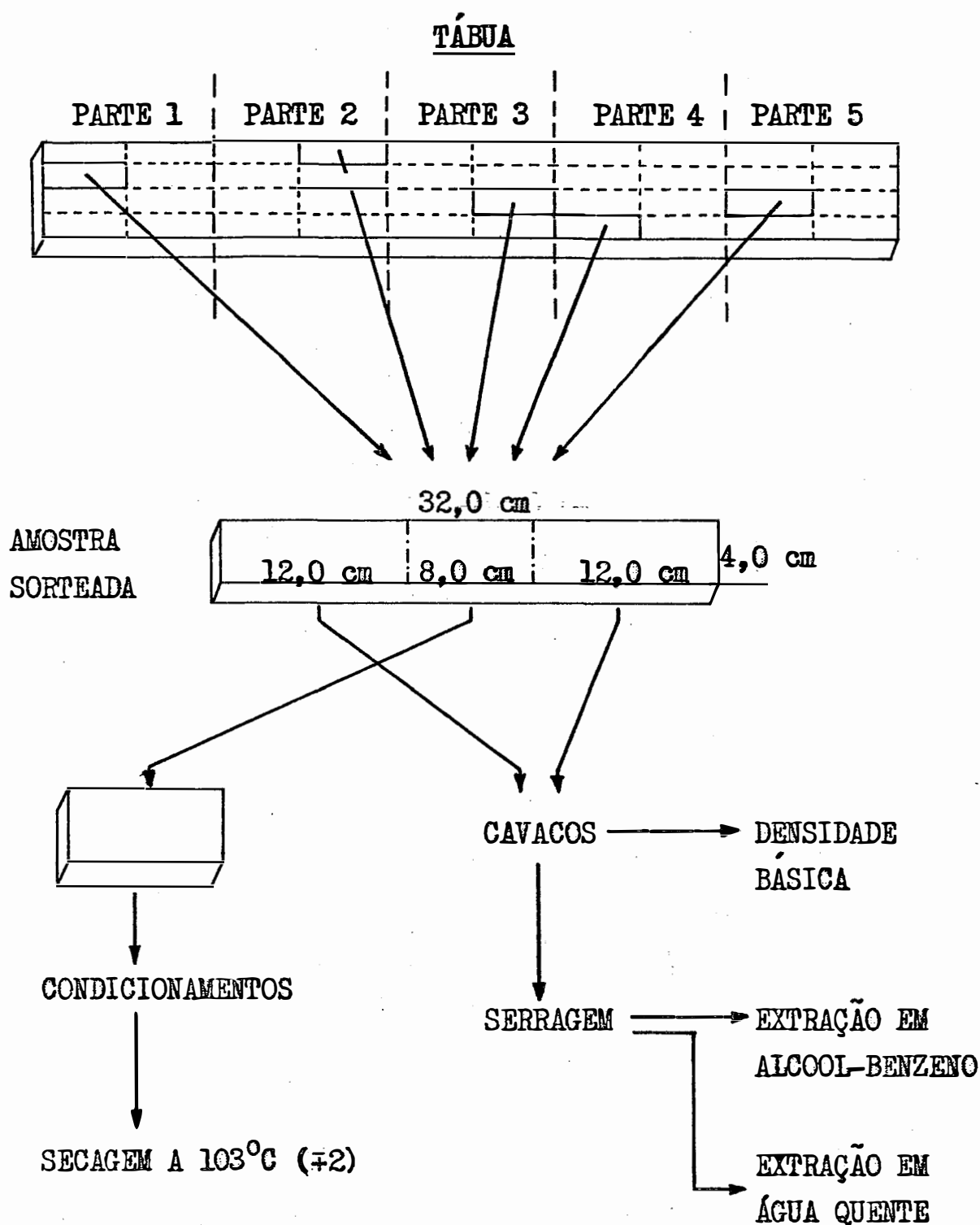


Figura 1. Esquema da amostragem e da destinação das amostras.

Tabela 1. Dimensões das tábuas e identificação das amostras.

ESPÉCIE	TÁBUA Nº	DIMENSÕES (m)			AMOSTRAS Nº
		comp.	larg.	esp.	
PINHO	I	2,325	0,305	0,025	1 a 5
	II	2,315	0,305	0,025	6 a 10
	III	2,335	0,307	0,025	11 a 15
	IV	2,300	0,300	0,025	16 a 20
MOGNO	I	2,560	0,420	0,030	1 a 5
	II	2,550	0,380	0,040	6 a 10
	III	2,520	0,530	0,030	11 a 15
	IV	2,340	0,290	0,040	16 a 20
EUCALIPTO	I	6,015	0,310	0,025	1 a 5
	II	6,250	0,350	0,040	6 a 10
	III	6,015	0,360	0,040	11 a 15

LEIRA DE CELULOSE E PAPEL(1974).

As sub-amostras centrais, separadas por espécie, foram colocadas no climatizador regulado para a seguinte sequencia de condicionamentos:

- a) 40°C de temperatura e 60% de umidade relativa;
- b) 50°C de temperatura e 40% de umidade relativa;
- c) 50°C de temperatura e 60% de umidade relativa;
- d) 50°C de temperatura e 79% de umidade relativa;
- e) 60°C de temperatura e 60% de umidade relativa.

As amostras permaneceram em condicionamento, nas cinco diferentes condições estabelecidas, até terem atingido o equilíbrio de umidade com as condições do climatizador. A aferição foi feita através de pesagens consecutivas, considerando-se o equilíbrio atingido quando a diferença de peso entre três pesagens consecutivas era menor ou igual a 0,02 g. Nessas condições a amostra tinha seu peso de equilíbrio registrado, dando-se sequencia ao condicionamento seguinte.

Após os cinco condicionamentos foram determinados os pesos secos das amostras através de secagem em estufa à 103°C (± 2), e então calculadas as umidades de equilíbrio. Todo o procedimento experimental descrito foi aplicado tomando-se o devido cuidado para manter a identificação individual de cada amostra.

Foram estudadas as correlações da umidade de equilíbrio com a densidade básica e os teores de extrativos solúveis em água e em álcool-benzeno, em função das diferentes temperaturas e umidades relativas utilizadas. Foi verificada também a correlação existente entre a densidade básica e o teor de extrativos.

4.2.3. Estudo teórico da adsorção.

Com os valores da umidade de equilíbrio obtidos à 50°C de temperatura e umidades relativas de 40%, 60%, e 79%, foram determinados os parâmetros K_1 , K_2 e M da equação teórica de Hailwood e Horrobin, descrita por SKAAR(1972). Assim, foi possível determinar as isotermas higroscópicas de adsorção para as três espécies estudadas, bem como analisar a adsorção monomolecular e polimolecular de umidade.

A umidade de saturação das fibras foi determinada extrapolando-se as isotermas para 100% de umidade relativa. Nessas condições foram estudadas as correlações da água adsorvida monomolecular e polimolecularmente com a umidade total adsorvida e com o valor de M, conforme preconizado por SPALT(1958) e WANGAARD e GRANADOS(1967).

4.2.4. Análise estatística.

A relação funcional entre duas variáveis foi estudada através de regressão linear simples com modelo geral

$$y = A + Bx + e_i$$

onde y = variável dependente

x = variável independente

A e B = parâmetros

e_i = erro

Os parâmetros A e B foram estimados pelo método dos quadrados mínimos, descrito por HOFFMANN(1977).

A escolha do modelo de regressão linear simples baseia-se em testes preliminares que mostraram ser essa a equação, dentre os diversos modelos analisados, que melhor se ajustou aos dados experimentais.

As equações obtidas foram submetidas à análise da variância utilizando-se o teste F, sendo que ao parâmetro (B) foi aplicado o teste t. Para ambos os testes adotou-se o nível de 5% de probabilidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade básica (DB) e os teores de extrativos solúveis em água (Ea) e em álcool-benzeno (Eb), para as madeiras de pinho, mogno e eucalipto são apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4 respectivamente.

Os valores da umidade de equilíbrio (UE) determinadas experimentalmente à temperaturas (T) de 40°C, 50°C e 60°C e umidades relativas (UR) de 40%, 60% e 79% constam das Tabelas 5, 6 e 7.

As Figuras 2 a 19 mostram as correlações da umidade de equilíbrio com a densidade básica e com os teores de extrativos solúveis em água e em álcool-benzeno, para as três espécies utilizadas e em função das variações na temperatura e na umidade relativa.

As Figuras 20 e 21 apresentam as correlações entre a densidade básica e os teores de extrativos solúveis em água e em álcool-benzeno para as três espécies estudadas.

As análises das variâncias correspondentes às regressões das Figuras 2 a 21 constam nas Tabelas 8 a 18.

Tabela 2. Valores da densidade básica (DB) e teores de extra-
tivos solúveis em água (Ea) e solúveis em álcool -
benzeno (Eb), para madeira de pinho.

Amostra Nº	DB	Ea (%)	Eb (%)
1	0,356	4,90	2,60
2	0,389	6,00	2,50
3	0,399	1,80	3,40
4	0,412	2,90	4,00
5	0,413	3,50	3,60
6	0,424	4,90	1,50
7	0,437	4,50	3,20
8	0,448	3,00	1,20
9	0,459	2,80	1,30
10	0,472	5,50	7,80
11	0,476	6,70	5,30
12	0,476	3,90	2,00
13	0,479	3,00	1,80
14	0,485	6,60	8,20
15	0,491	5,50	6,30
16	0,507	5,10	2,80
17	0,510	6,70	4,20
18	0,512	6,90	8,70
19	0,520	4,80	2,90
20	0,545	3,40	2,50
Média	0,461	4,62	3,79
Erro Padrão	0,011	0,34	0,51

Tabela 3. Valores da densidade básica (DB) e teores de extra-
tivos solúveis em água (Ea) e solúveis em álcool-
benzeno (Eb), para madeira de mogno.

Amostra Nº	DB	Ea (%)	Eb (%)
1	0,432	7,10	5,10
2	0,438	6,60	4,50
3	0,441	5,60	5,60
4	0,458	9,20	7,40
5	0,459	9,50	7,20
6	0,459	7,50	6,30
7	0,470	7,60	6,40
8	0,471	7,80	5,70
9	0,472	8,20	6,30
10	0,476	6,80	4,80
11	0,480	7,80	5,30
12	0,486	7,70	6,50
13	0,492	7,90	6,40
14	0,494	9,20	7,60
15	0,505	12,00	10,00
16	0,509	6,10	4,10
17	0,510	11,10	10,20
18	0,532	12,80	10,70
19	0,582	11,10	9,70
20	0,612	11,20	10,70
Média	0,489	8,64	7,03
Erro Padrão	0,010	0,46	0,48

Tabela 4. Valores da densidade básica (DB) e teores de extra-
tivos solúveis em água (Ea) e solúveis em álcool-
benzeno (Eb), para madeira de eucalipto.

Amostra Nº	DB	Ea (%)	Eb (%)
1	0,762	5,60	3,50
2	0,769	6,00	4,40
3	0,778	5,10	3,60
4	0,779	5,90	4,30
5	0,784	5,70	4,40
6	0,784	5,50	3,70
7	0,785	6,70	3,90
8	0,790	6,50	3,90
9	0,809	6,90	3,20
10	0,810	7,10	4,20
11	0,816	5,30	3,20
12	0,819	5,90	4,60
13	0,827	7,10	5,40
14	0,831	6,50	4,20
15	0,893	9,30	6,80
Média	0,803	6,34	4,22
Erro Padrão	0,009	0,27	0,24

Tabela 5. Umidades de equilíbrio (UE) para madeira de pinho, determinadas experimentalmente à temperaturas (T) de 40°C, 50°C e 60°C e umidades relativas (UR) de 40%, 60% e 79%.

Amostra Nº	Umidade de equilíbrio (%)				
	T=40°C UR=60%	T=50°C UR=40%	T=50°C UR=60%	T=50°C UR=79%	T=60°C UR=60%
1	10,42	6,65	9,76	14,43	9,10
2	10,35	6,42	9,90	14,90	9,16
3	10,26	6,39	9,87	14,54	9,68
4	10,31	6,46	9,49	14,14	9,25
5	10,13	6,58	9,46	13,87	9,30
6	10,66	6,62	10,17	14,93	9,97
7	10,15	6,21	9,54	14,14	9,14
8	10,60	6,85	9,99	14,71	10,05
9	10,45	6,49	9,97	14,34	9,22
10	9,47	5,89	8,65	13,34	8,51
11	9,87	6,03	9,34	13,30	9,11
12	11,05	7,13	10,28	14,74	9,92
13	10,83	6,76	9,89	14,66	9,78
14	9,44	6,02	8,87	12,89	8,86
15	9,66	6,02	9,11	13,28	8,86
16	10,42	6,57	9,57	14,02	9,12
17	10,19	6,42	9,24	14,06	9,08
18	9,41	5,97	8,64	13,16	8,23
19	10,16	6,41	9,51	14,47	9,30
20	10,28	6,42	9,73	14,22	9,95
Média	10,21	6,42	9,55	14,11	9,28
Erro Padrão	0,10	0,07	0,10	0,14	0,11

Tabela 6. Umidades de equilíbrio (UE) para madeira de mogno, determinadas experimentalmente à temperaturas (T) de 40°C, 50°C e 60°C e umidades relativas (UR) de 40%, 60% e 79%.

Amostra Nº	Umidade de equilíbrio (%)				
	T=40°C	T=50°C	T=50°C	T=50°C	T=60°C
	UR=60%	UR=40%	UR=60%	UR=79%	UR=60%
1	11,32	6,74	9,25	12,95	9,12
2	11,22	6,66	9,17	12,77	8,85
3	11,31	6,73	9,09	13,09	8,99
4	10,52	6,28	8,58	11,98	8,60
5	10,63	6,32	8,72	11,92	8,70
6	10,76	6,54	9,11	12,57	8,93
7	10,84	6,48	8,92	12,22	8,63
8	10,85	6,54	9,09	12,30	8,05
9	10,76	6,21	8,63	12,04	8,58
10	11,02	6,81	9,11	12,81	9,35
11	11,17	6,52	8,98	12,36	8,90
12	11,02	6,38	9,04	12,23	8,47
13	10,69	6,44	8,76	11,85	8,51
14	10,47	6,22	8,50	11,56	8,38
15	10,42	6,46	8,61	11,88	8,60
16	10,74	6,49	8,88	12,61	8,65
17	10,49	6,38	8,60	11,66	7,88
18	10,34	6,36	8,66	11,67	8,42
19	10,34	6,17	8,59	11,66	8,20
20	10,79	6,37	8,52	12,00	8,51
Média	10,79	6,46	8,84	12,21	8,62
Erro Padrão	0,07	0,04	0,06	0,10	0,08

Tabela 7. Umidades de equilíbrio (UE) para madeira de eucalipto, determinadas experimentalmente à temperaturas (T) de 40°C, 50°C e 60°C e umidades relativas (UR) de 40%, 60% e 79%.

Amostra Nº	Umidade de equilíbrio (%)				
	T=40°C	T=50°C	T=50°C	T=50°C	T=60°C
	UR=60%	UR=40%	UR=60%	UR=79%	UR=60%
1	8,80	5,12	7,44	11,54	7,77
2	8,80	5,00	7,44	11,87	7,53
3	8,82	4,99	7,65	10,75	7,40
4	8,90	5,19	7,96	11,97	7,59
5	9,04	5,20	8,13	12,42	7,38
6	8,56	4,87	7,61	11,61	7,32
7	8,67	5,06	7,50	11,46	7,40
8	7,95	4,26	6,69	10,50	6,64
9	8,90	5,10	7,95	11,89	7,76
10	7,83	4,26	6,72	10,62	6,45
11	8,97	5,35	7,95	12,15	7,61
12	8,04	4,52	6,71	10,53	6,94
13	7,73	4,20	6,46	10,06	6,13
14	7,82	4,19	6,21	10,31	6,25
15	7,32	3,80	5,75	8,91	5,80
Média	8,41	4,74	7,21	11,11	7,06
Erro Padrão	0,15	0,13	0,19	0,25	0,17

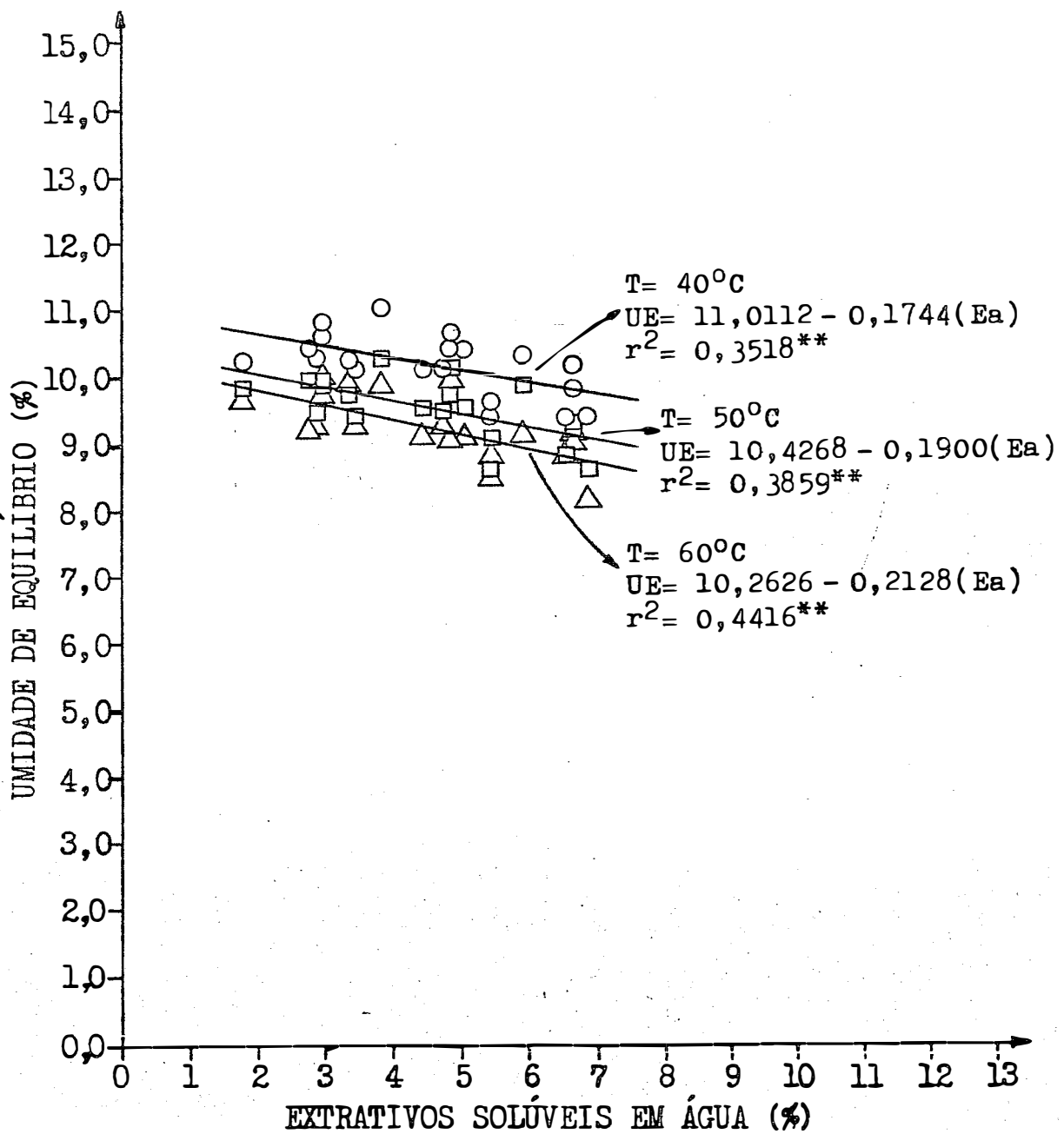


Figura 2. Relação entre a umidade de equilíbrio (UE) e o teor de extrativos solúveis em água (Ea), para madeira de pinho à 60% de umidade relativa e temperaturas (T) de 40°C, 50°C e 60°C.

** = teste t(B) significativo ao nível de 1% de probabilidade.

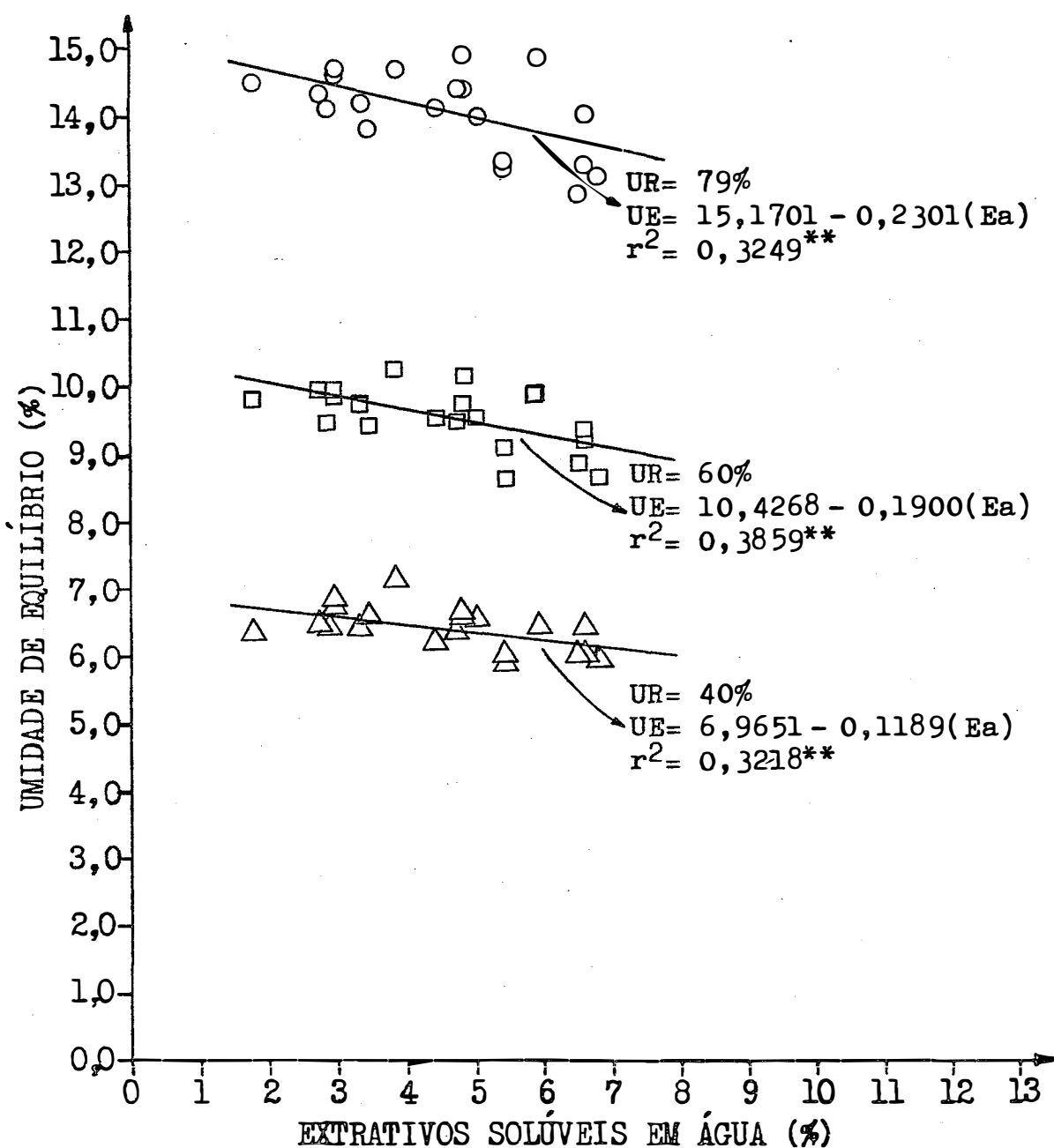


Figura 3. Relação entre a unidade de equilíbrio (UE) e o teor de extrativos soluveis em água (Ea), para madeira de pinho à 50°C de temperatura e umidades relativas (UR) de 40%, 60% e 79%.

** = teste t(B) significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 8. Análise da variância para a correlação entre a umidade de equilíbrio (UE) e o teor de extrativos solúveis em água (Ea), para madeira de pinho em diferentes condições de temperatura (T) e umidade relativa (UR).

Causa de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	r ²
<u>T=40°C, UR=60% (c.v.=3,64%)</u>					
Regressão	1	1,350280	1,350280	9,77**	0,3518**
Resíduo	18	2,488221	0,138235		
Total	19	3,838501			
<u>T=50°C, UR=40% (c.v.=4,23%)</u>					
Regressão	1	0,628290	0,628290	8,54**	0,3218**
Resíduo	18	1,324007	0,075559		
Total	19	1,952297			
<u>T=50°C, UR=60% (c.v.=3,94%)</u>					
Regressão	1	1,602596	1,602596	11,31**	0,3859**
Resíduo	18	2,549792	0,141655		
Total	19	4,152388			
<u>T=50°C, UR=79% (c.v.=3,69%)</u>					
Regressão	1	2,350931	2,350931	8,66**	0,3249**
Resíduo	18	4,885508	0,271417		
Total	19	7,236439			
<u>T=60°C, UR=60% (c.v.=4,05%)</u>					
Regressão	1	2,010317	2,010317	14,24**	0,4416**
Resíduo	18	2,541584	0,141199		
Total	19	4,551901			

c.v. = coeficiente de variação.

** = significativo ao nível de 5% de probabilidade.

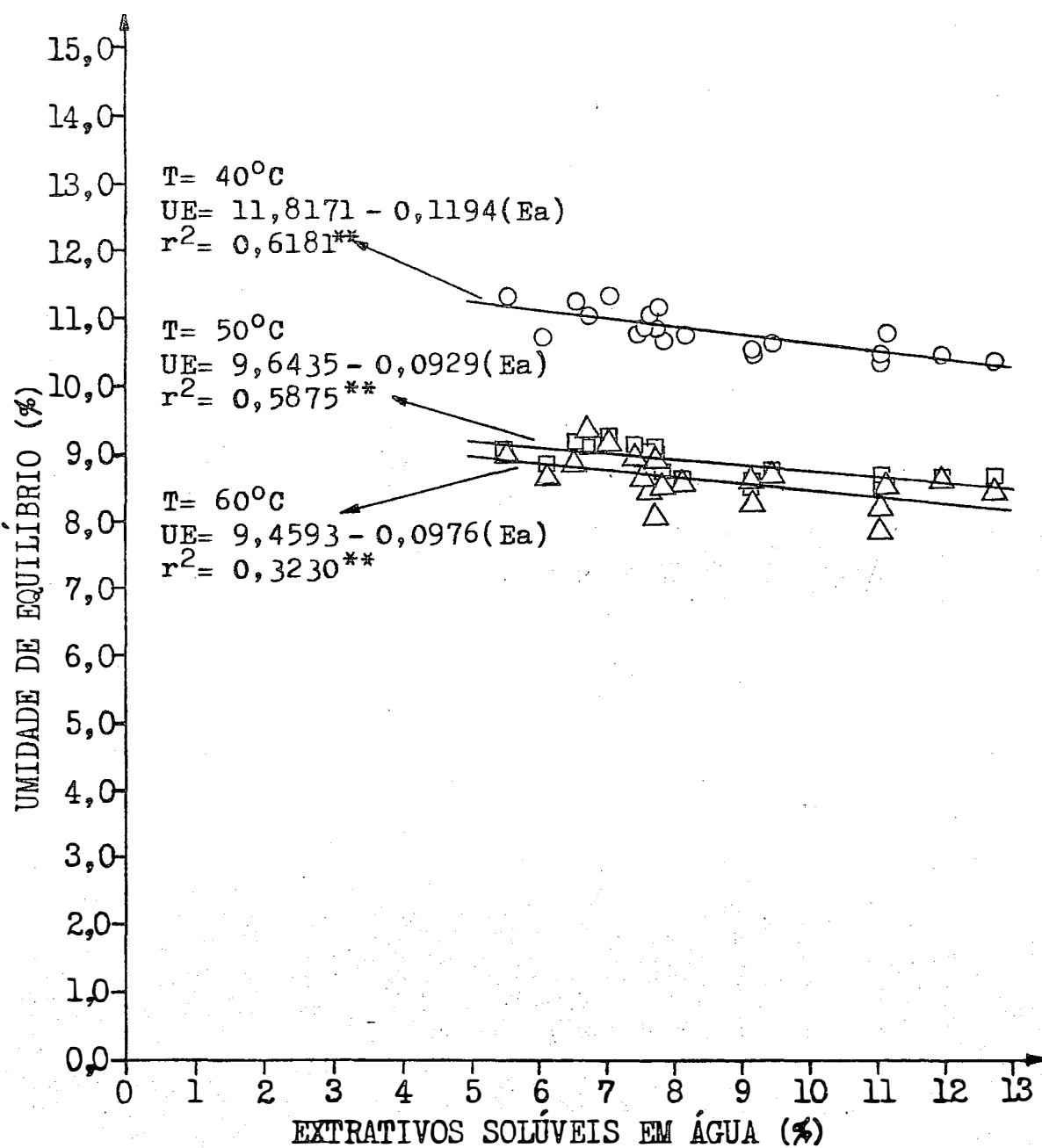


Figura 4. Relação entre a umidade de equilíbrio (UE) e o teor de extrativos solúveis em água (Ea), para madeira de mogno à 60% de umidade relativa e temperaturas (T) de 40°C, 50°C e 60°C.

** = teste t(B) significativo ao nível de 1% de probabilidade.

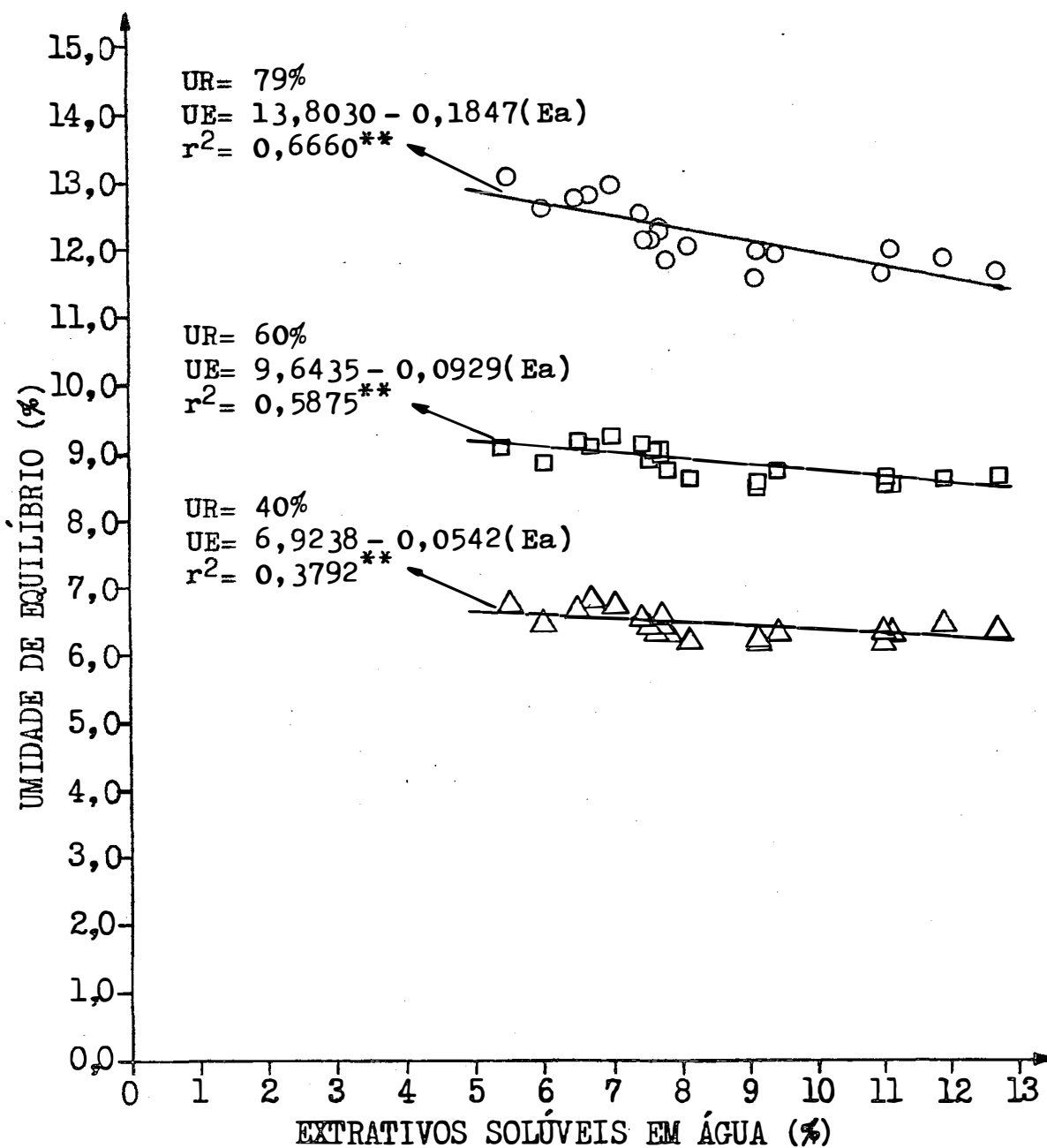


Figura 5. Relação entre a umidade de equilíbrio (UE) e o teor de extrativos solúveis em água (Ea), para madeira de mogno à temperatura de 50°C e umidades relativas (UR) de 40%, 60% e 79%.

** = teste t(B) significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 9. Análise da variância para a correlação entre a umidade de equilíbrio (UE) e o teor de extrativos solúveis em água (Ea), para a madeira de mogno em diferentes condições de temperatura (T) e umidade relativa (UR).

Causa de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	r ²
<u>T=40°C, UR=60% (c.v.=1,83%)</u>					
Regressão	1	1,136690	1,136690	29,13**	0,6181**
Resíduo	18	0,702416	0,039023		
Total	19	1,839106			
<u>T=50°C, UR=40% (c.v.=2,26%)</u>					
Regressão	1	0,234527	0,234527	10,99**	0,3792**
Resíduo	18	0,383977	0,021332		
Total	19	0,618504			
<u>T=50°C, UR=60% (c.v.=1,85%)</u>					
Regressão	1	0,688156	0,688156	25,64**	0,5875**
Resíduo	18	0,483145	0,026841		
Total	19	1,171301			
<u>T=50°C, UR=79% (c.v.=2,26%)</u>					
Regressão	1	2,719780	2,719780	35,89**	0,6660**
Resíduo	18	1,363892	0,075772		
Total	19	4,083672			
<u>T=60°C, UR=60% (c.v.=3,45%)</u>					
Regressão	1	0,758932	0,758932	8,59**	0,3230**
Resíduo	18	1,590954	0,088386		
Total	19	2,349886			

c.v.= coeficiente de variação.

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade.

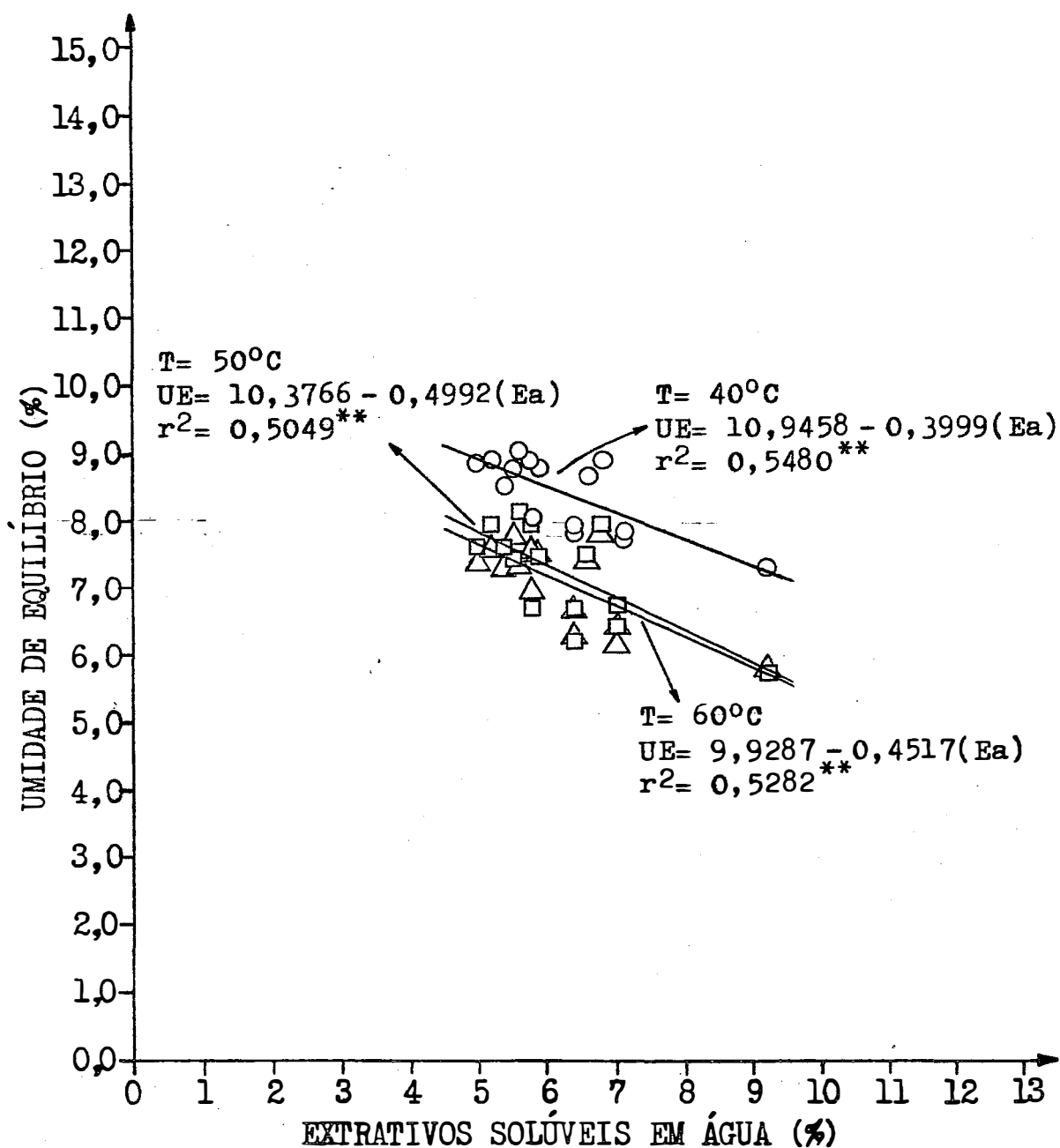


Figura 6. Relação entre a umidade de equilíbrio (UE) e o teor de extrativos solúveis em água (Ea), para madeira de eucalipto citriodora à umidade relativa de 60% e temperaturas (T) de 40°C, 50°C e 60°C.

** = teste t(B) significativo ao nível de 1% de probabilidade.

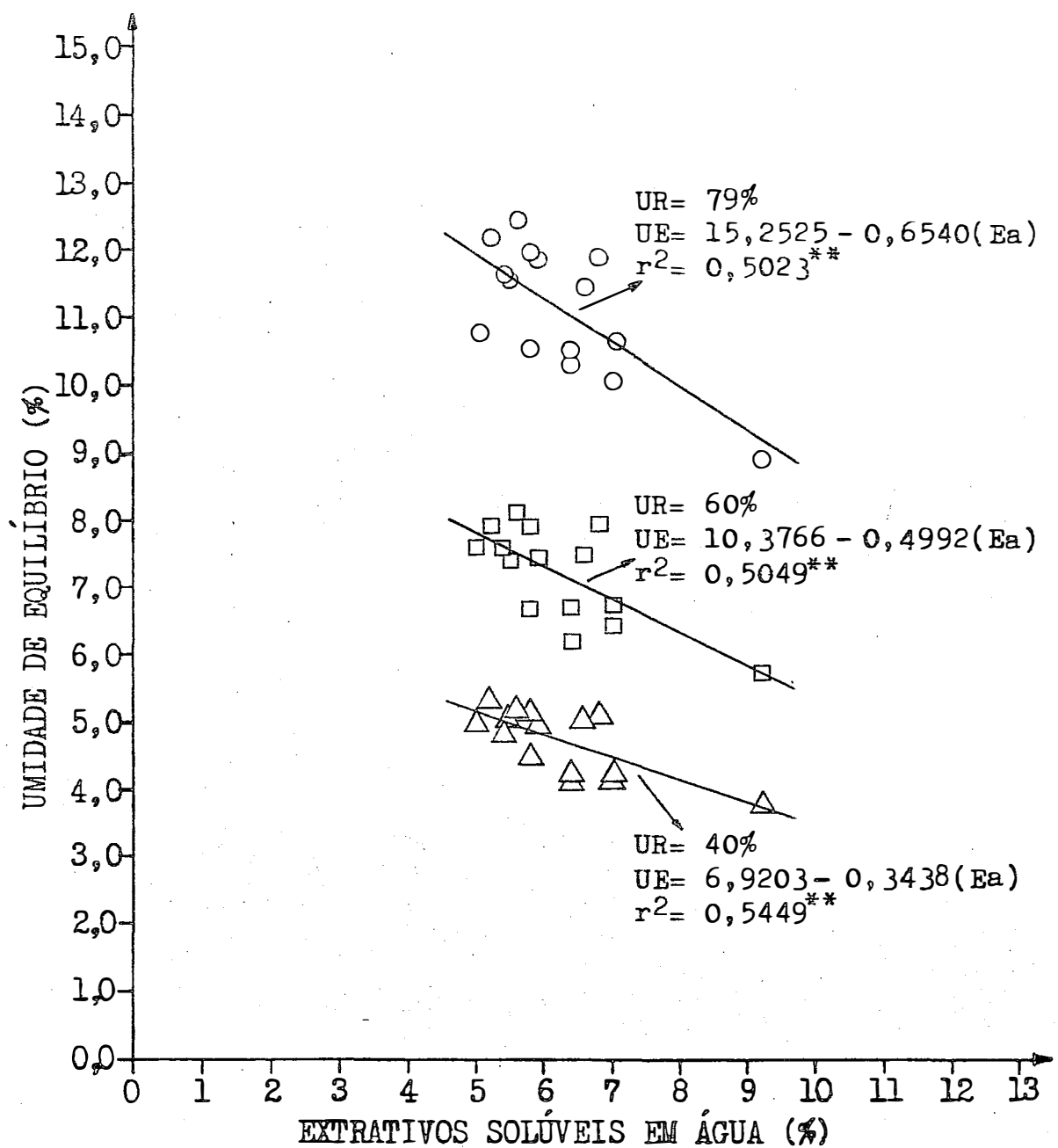


Figura 7. Relação entre a umidade de equilíbrio (UE) e o teor de extrativos soluveis em água (Ea), para madeira de eucalipto citriodora à temperatura de 50°C e umidades relativas de 40%, 60% e 79%.

** = teste t(B) significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 10. Análise da variância para a correlação entre a unidade de equilíbrio (UE) e o teor de extrativos solúveis em água (Ea), para a madeira de eucalipto em diferentes condições de temperatura (T) e umidade relativa (UR).

Causa de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	r ²
<u>T=40°C, UR=60% (c.v.=4,67%)</u>					
Regressão	1	2,431038	2,431038	15,76**	0,5480**
Resíduo	13	2,005564	0,154274		
Total	14	4,436602			
<u>T=50°C, UR=40% (c.v.=7,16%)</u>					
Regressão	1	1,796153	1,796153	15,56**	0,5449**
Resíduo	13	1,500342	0,115411		
Total	14	3,296495			
<u>T=50°C, UR=60% (c.v.=7,41%)</u>					
Regressão	1	3,787808	3,787808	13,26**	0,5049**
Resíduo	13	3,714365	0,285720		
Total	14	7,502173			
<u>T=50°C, UR=79% (c.v.=6,34%)</u>					
Regressão	1	6,500112	6,500112	13,12**	0,5023**
Resíduo	13	6,441053	0,495466		
Total	14	12,941165			
<u>T=60°C, UR=60% (c.v.=6,53%)</u>					
Regressão	1	3,101175	3,101175	14,56**	0,5282**
Resíduo	13	2,769599	0,213046		
Total	14	5,870774			

c.v.= coeficiente de variação.

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade.

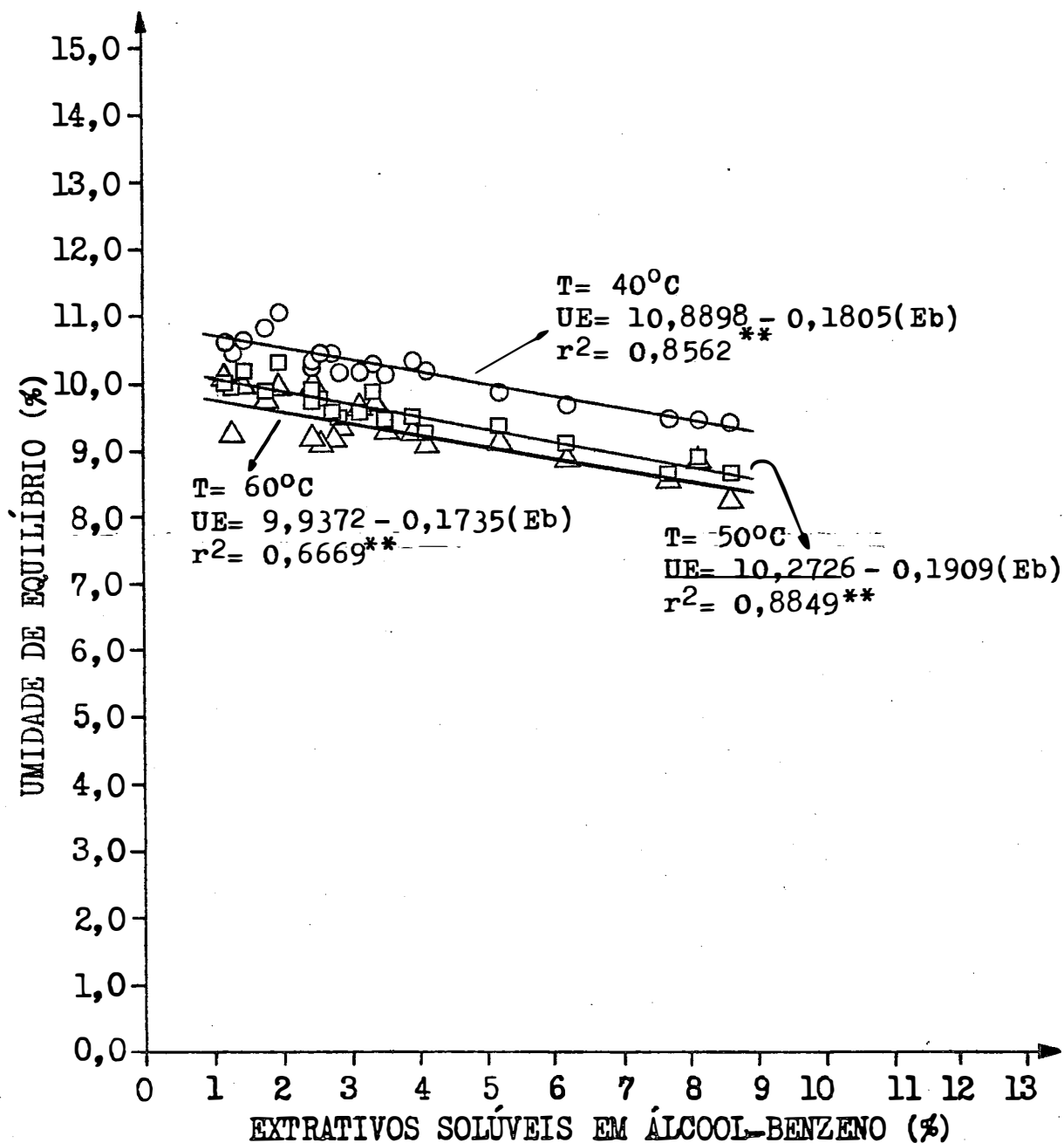


Figura 8. Relação entre a umidade de equilíbrio (UE) e o teor de extrativos solúveis em álcool-benzeno (Eb), para madeira de pinho à umidade relativa de 60% e temperaturas (T) de 40°C, 50°C e 60°C.

** = teste t(B) significativo ao nível de 1% de probabilidade.

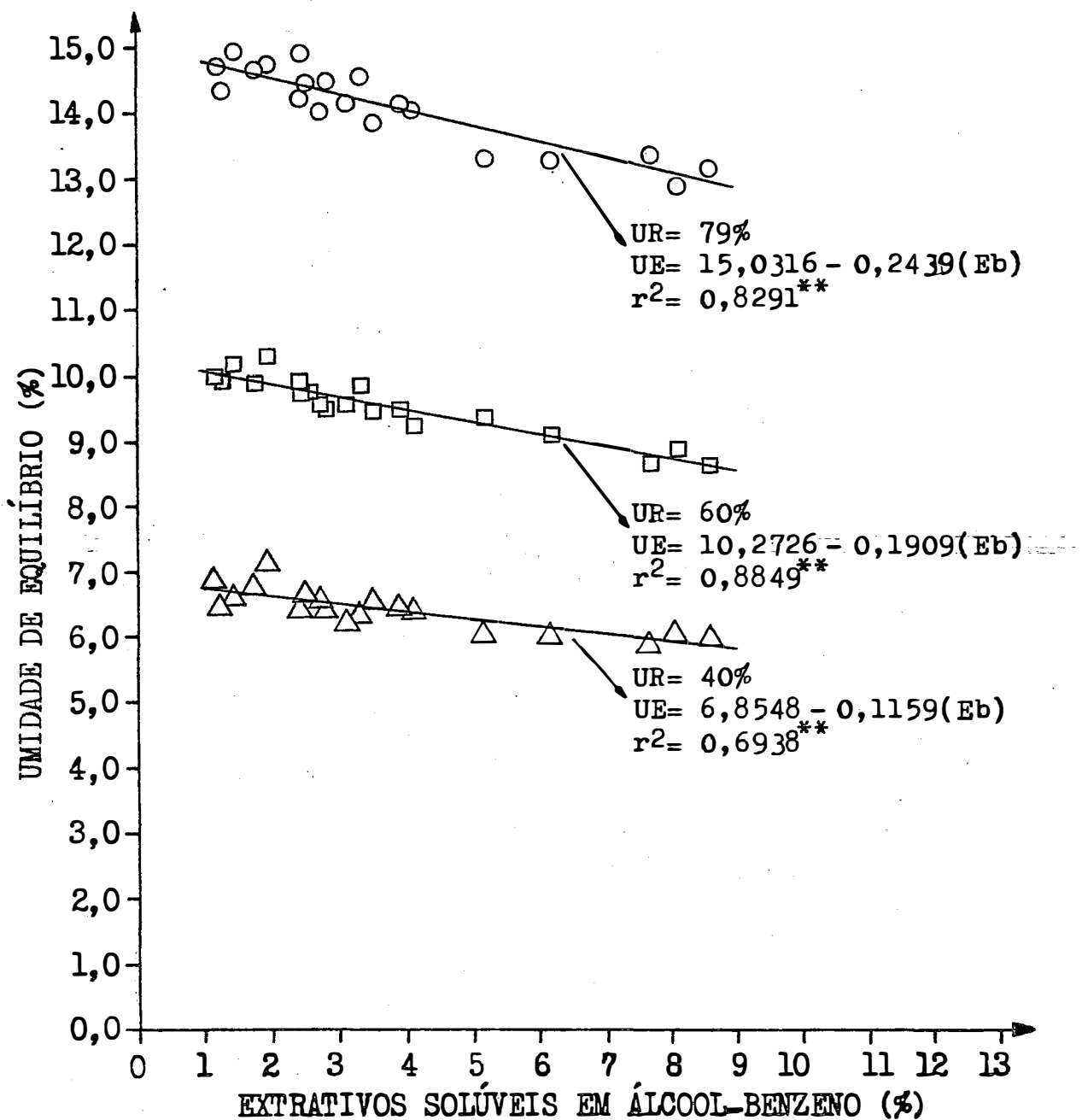


Figura 9. Relação entre a umidade de equilíbrio (UE) e o teor de extrativos solúveis em álcool-benzeno (Eb), para madeira de pinho à temperatura de 50°C e umidades relativas (UR) de 40%, 60% e 79%.

** = teste t(B) significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 11. Análise da variância para a correlação entre a umidade de equilíbrio (UE) e o teor de extrativos solúveis em álcool-benzeno (Eb), para madeira de pinho em diferentes condições de temperatura (T) e umidade relativa (UR).

Causa de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	r ²
<u>T=40°C, UR=60% (c.v.=1,71%)</u>					
Regressão	1	3,286501	3,286501	107,17**	0,8562**
Resíduo	18	0,552000	0,030667		
Total	19	3,838501			
<u>T=50°C, UR=40% (c.v.=2,84%)</u>					
Regressão	1	1,354559	1,354559	40,79**	0,6938**
Resíduo	18	0,597738	0,033208		
Total	19	1,952297			
<u>T=50°C, UR=60% (c.v.=1,71%)</u>					
Regressão	1	3,674455	3,674455	138,39**	0,8849**
Resíduo	18	0,477933	0,026552		
Total	19	4,152388			
<u>T=50°C, UR=79% (c.v.=1,86%)</u>					
Regressão	1	6,000078	6,000078	87,35**	0,8291**
Resíduo	18	1,236361	0,068687		
Total	19	7,236439			
<u>T=60°C, UR=60% (c.v.=3,13%)</u>					
Regressão	1	3,035512	3,035512	36,03**	0,6669**
Resíduo	18	1,516389	0,084244		
Total	19	4,551901			

c.v.= coeficiente de variação.

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade.

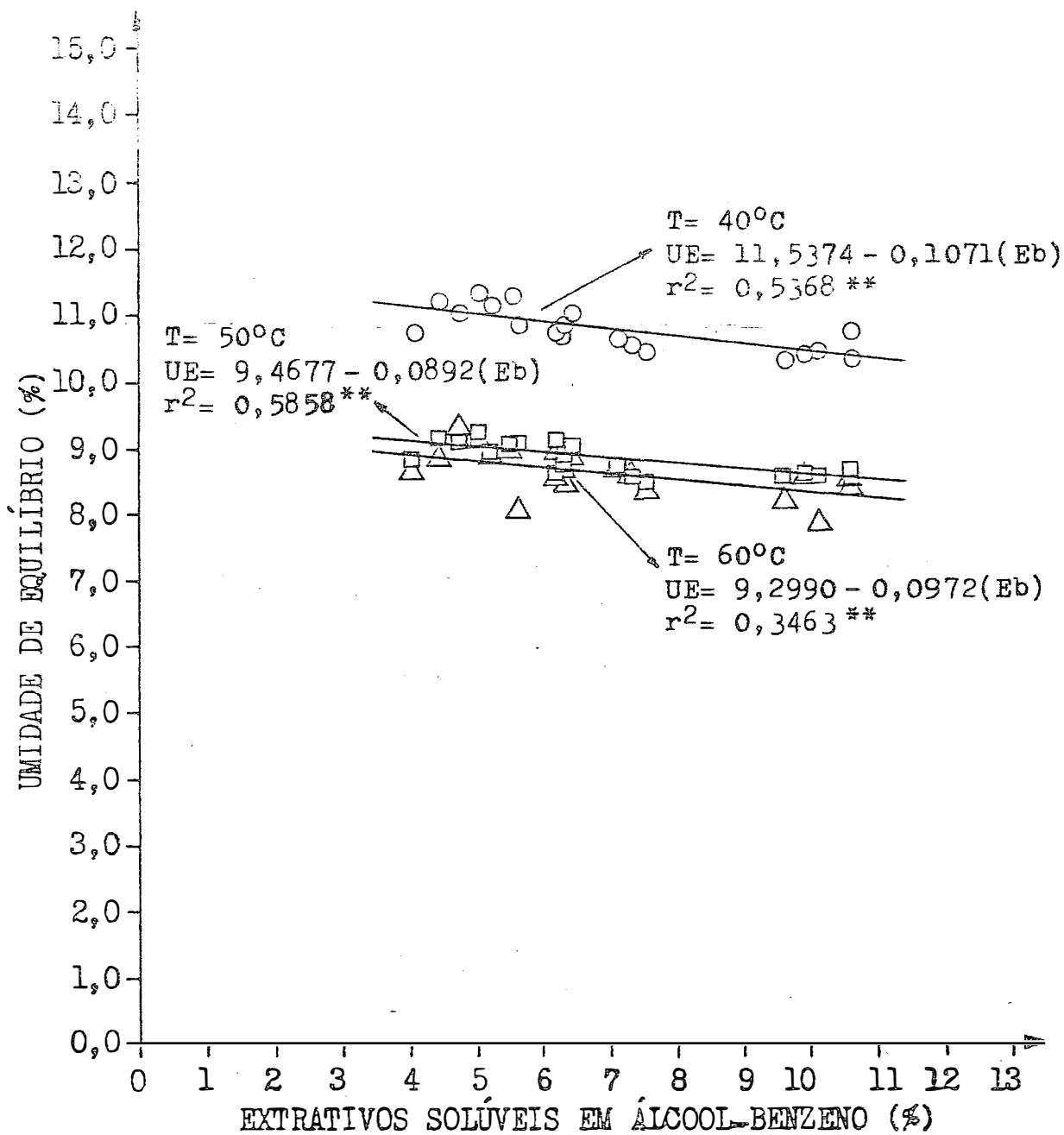


Figura 10. Relação entre a umidade de equilíbrio (UE) e o teor de extrativos soluveis em álcool-benzeno (Eb), para madeira de mogno à 60% de umidade relativa e temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.

** = teste t(B) significativo ao nível de 1% de probabilidade.

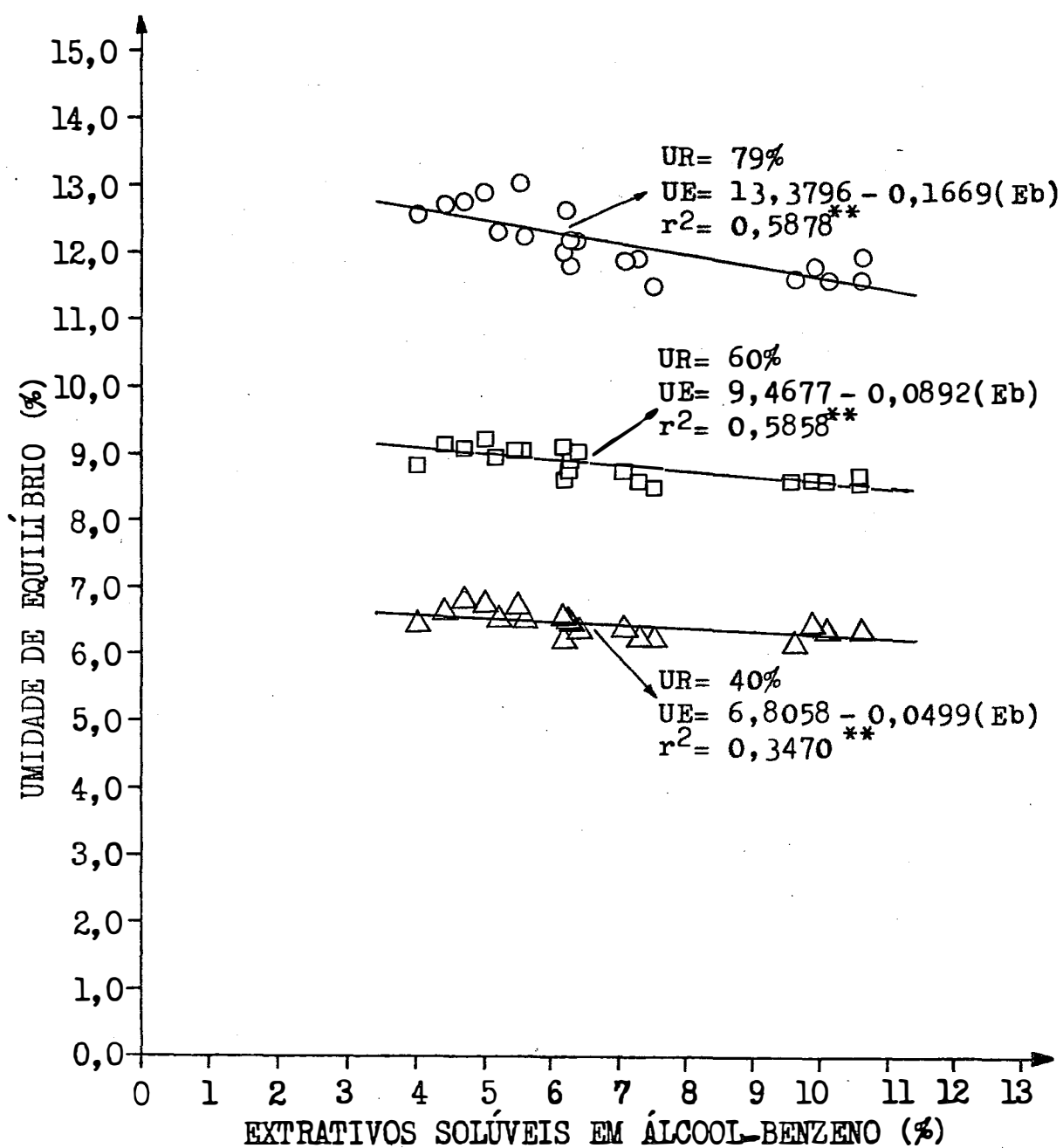


Figura 11. Relação entre a umidade de equilíbrio(UE) e o teor de extrativos soluveis em álcool-benzeno (Eb), para madeira de mogno à temperatura de 50°C e umidades relativas de 40%, 60% e 79%.

** = teste t(B) significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 12. Análise da variância para a correlação entre a unidade de equilíbrio (UE), e o teor de extrativos solúveis em álcool-benzeno (Eb), para madeira de mogno em diferentes condições de temperatura (T) e umidade relativa (UR).

Causa de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	r ²
<u>T=40°C, UR=60% (c.v.=2,02%)</u>					
Regressão	1	0,987273	0,987273	20,86**	0,5368**
Resíduo	18	0,851833	0,047324		
Total	19	1,839106			
<u>T=50°C, UR=40% (c.v.=2,32%)</u>					
Regressão	1	0,214608	0,214606	9,56**	0,3470**
Resíduo	18	0,403898	0,022439		
Total	19	0,618504			
<u>T=50°C, UR=60% (c.v.=1,86%)</u>					
Regressão	1	0,686142	0,686142	25,46**	0,5858**
Resíduo	18	0,485159	0,026953		
Total	19	1,171301			
<u>T=50°C, UR=79% (c.v.=2,51%)</u>					
Regressão	1	2,399938	2,399938	25,66**	0,5878**
Resíduo	18	1,683734	0,093541		
Total	19	4,083672			
<u>T=60°C, UR=60% (c.v.=3,39%)</u>					
Regressão	1	0,813681	0,813681	9,53**	0,3463**
Resíduo	18	1,536205	0,085345		
Total	19	2,349886			

c.v.= coeficiente de variação.

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade.

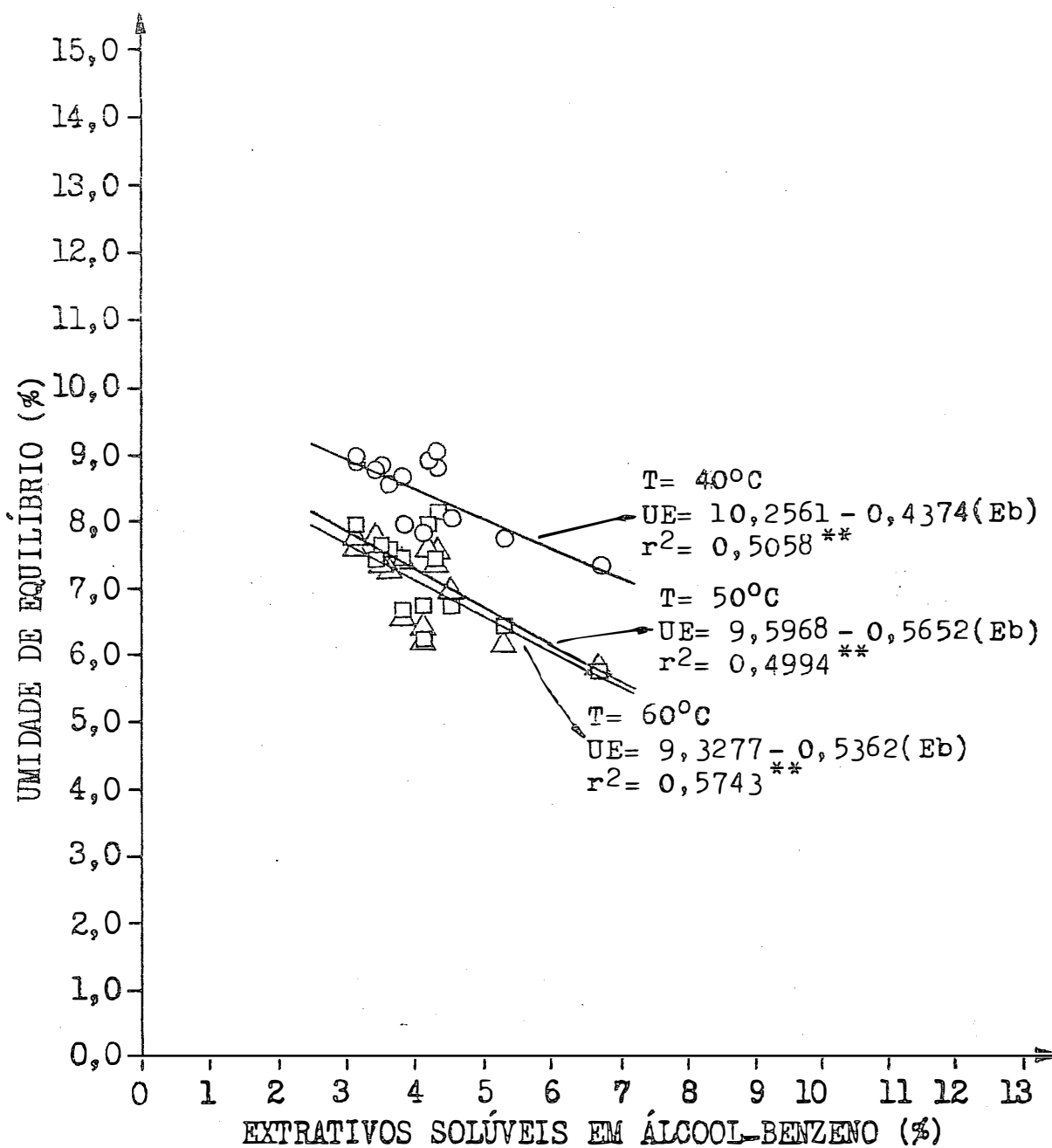


Figura 12. Relação entre a umidade de equilíbrio (UE) e o teor de extrativos solúveis em álcool-benzeno (Eb), para madeira de eucalipto citriodora à 60% de umidade relativa e temperaturas (T) de 40°C, 50°C e 60°C.

** = teste t(B) significativo ao nível de 1% de probabilidade.

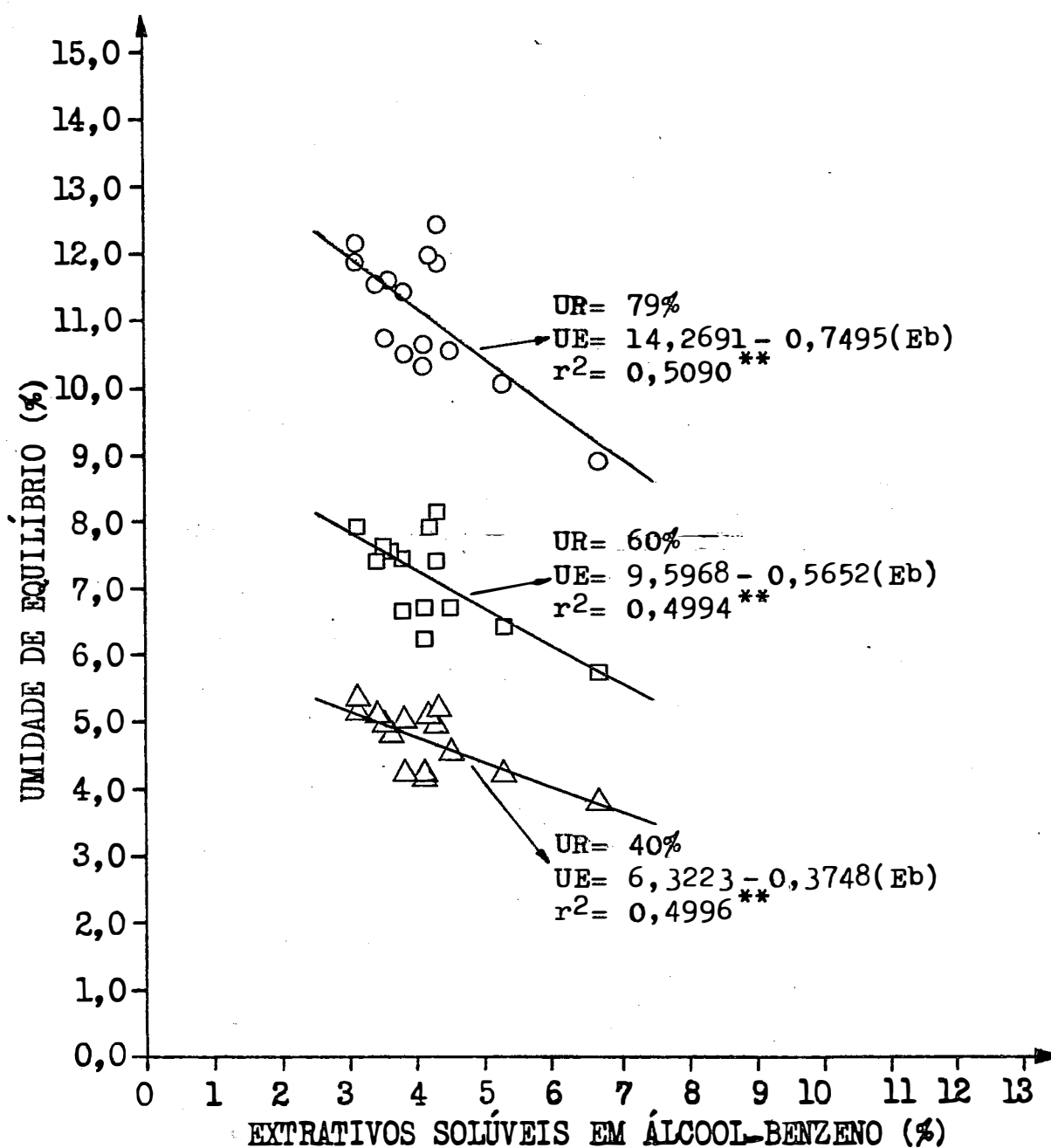


Figura 13. Relação entre a umidade de equilíbrio (UE) e o teor de extrativos soluveis em alcool-benzeno (Eb), para madeira de eucalipto citriodora à 50°C de temperatura e umidades relativas (UR) de 40%, 60% e 79%.

** = teste t(B) significativo ao nivel de 1% de probabilidade.

Tabela 13. Análise da variância para a correlação entre a umidade de equilíbrio (UE), e o teor de extrativos solúveis em álcool-benzeno (Eb), para madeira de eucalipto em diferentes condições de temperatura (T) e umidade relativa (UR).

Causa de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	r ²
<u>T=40°C, UR=60% (c.v.=4,88%)</u>					
Regressão	1	2,243827	2,243827	13,30**	0,5058**
Resíduo	13	2,192775	0,168675		
Total	14	4,436602			
<u>T=50°C, UR=40% (c.v.=7,51%)</u>					
Regressão	1	1,646962	1,646962	12,98**	0,4996**
Resíduo	13	1,649533	0,126887		
Total	14	3,296495			
<u>T=50°C, UR=60% (c.v.=7,45%)</u>					
Regressão	1	3,746369	3,746369	12,98**	0,4994**
Resíduo	13	3,755804	0,288908		
Total	14	7,502173			
<u>T=50°C, UR=79% (c.v.=6,30%)</u>					
Regressão	1	6,586952	6,586952	13,48**	0,5090**
Resíduo	13	6,354213	0,488786		
Total	14	12,941165			
<u>T=60°C, UR=60% (c.v.=6,21%)</u>					
Regressão	1	3,371834	3,371834	17,54**	0,5743**
Resíduo	13	2,398940	0,192226		
Total	14	5,870774			

c.v.= coeficiente de variação.

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade.

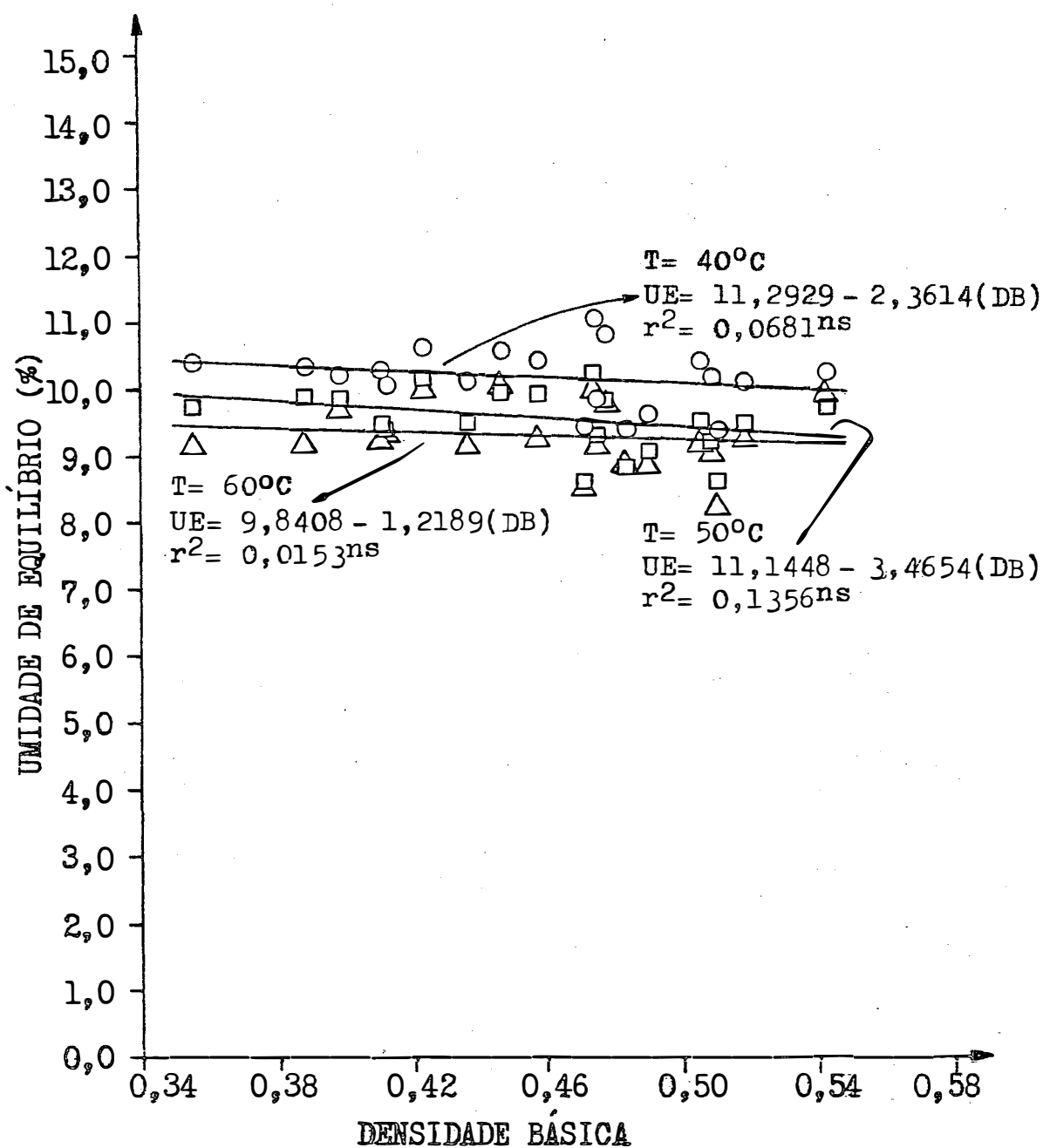


Figura 14. Relação entre a umidade de equilíbrio (UE) e a densidade básica (DB), para madeira de pinho à 60% de umidade relativa e temperaturas (T) de 40°C, 50°C e 60°C.

ns = teste t(B) não significativo.

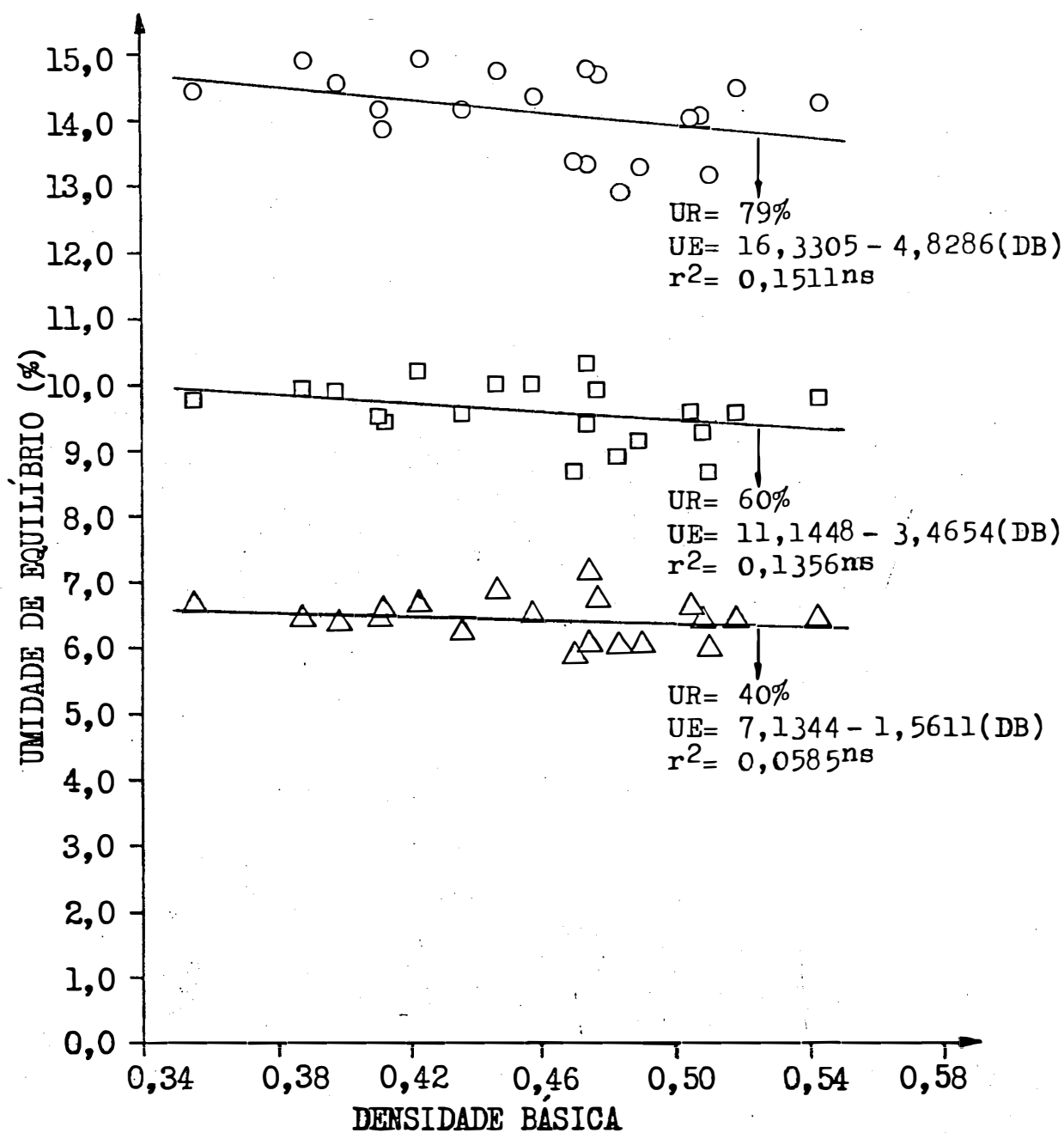


Figura 15. Relação entre a umidade de equilíbrio (UE) e a densidade básica (DB), para madeira de pinho à 50°C de temperatura e umidades relativas (UR) de 40%, 60% e 79%.

ns = teste t(B) não significativo.

Tabela 14. Análise da variância para a correlação entre a unidade de equilíbrio (UE) e a densidade básica (DB) para madeira de pinho em diferentes condições de temperatura (T) e umidade relativa (UR).

Causa de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	r ²
<u>T=40°C, UR=60% (c.v.=4,37%)</u>					
Regressão	1	0,261518	0,261518	1,32 ^{ns}	0,0681 ^{ns}
Resíduo	18	3,576981	0,198721		
Total	19	3,838499			
<u>T=50°C, UR=40% (c.v.=4,98%)</u>					
Regressão	1	0,114302	0,114302	1,12 ^{ns}	0,0585 ^{ns}
Resíduo	18	1,837995	0,102111		
Total	19	1,952297			
<u>T=50°C, UR=60% (c.v.=4,68%)</u>					
Regressão	1	0,563206	0,563206	2,82 ^{ns}	0,1356 ^{ns}
Resíduo	18	3,589182	0,199399		
Total	19	4,152388			
<u>T=50°C, UR=79% (c.v.=4,14%)</u>					
Regressão	1	1,093446	1,093446	3,20 ^{ns}	0,1511 ^{ns}
Resíduo	18	6,142993	0,341277		
Total	19	7,236439			
<u>T=60°C, UR=60% (c.v.=5,38%)</u>					
Regressão	1	0,069680	0,069680	0,28 ^{ns}	0,0153 ^{ns}
Resíduo	18	4,482221	0,249012		
Total	19	4,551901			

c.v.= coeficiente de variação.

ns = não significativo.

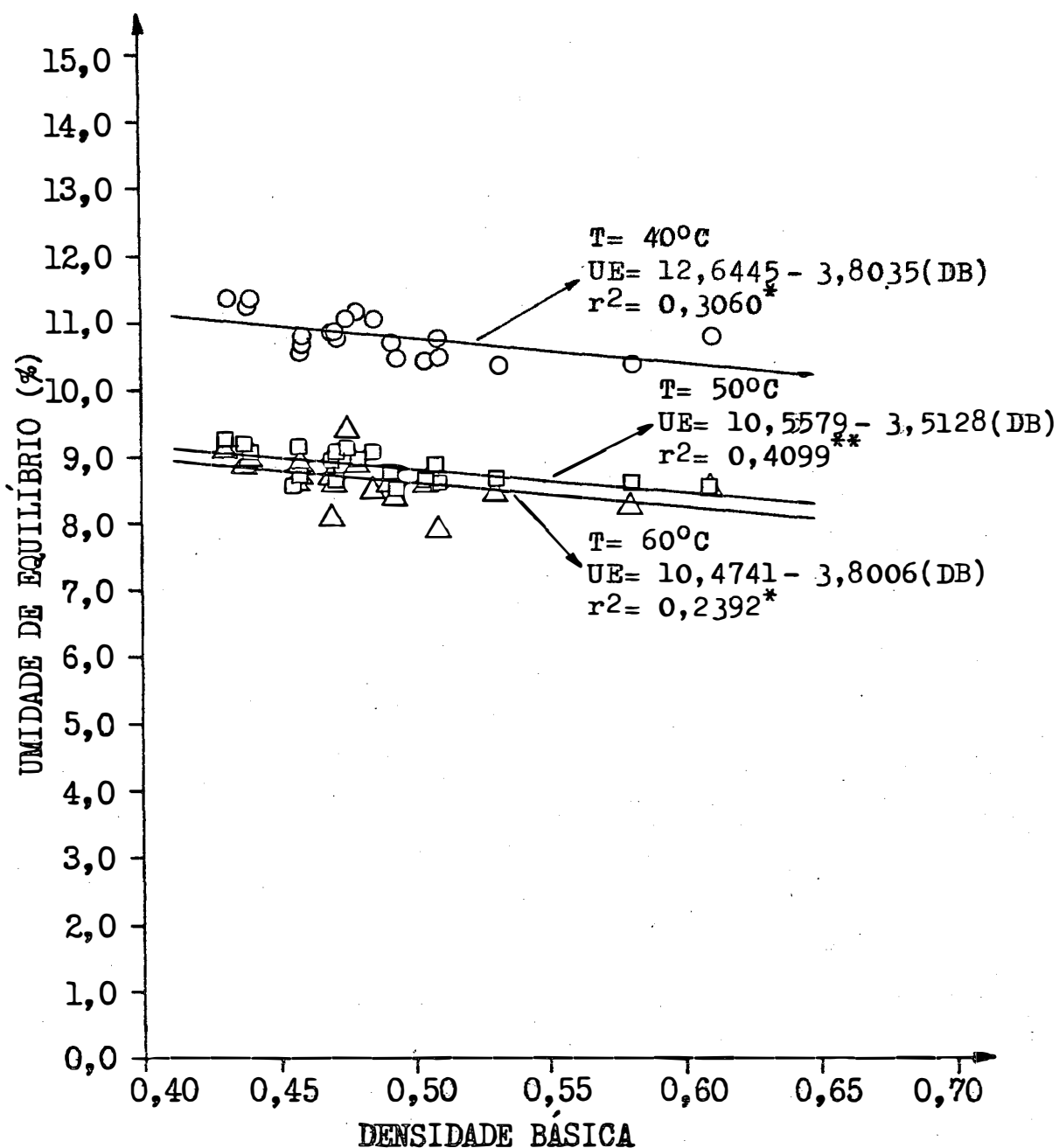


Figura 16. Relação entre a umidade de equilíbrio (UE) e a densidade básica (DB), para madeira de mogno à 60% de umidade relativa e temperaturas (T) de 40°C, 50°C e 60°C.

* = teste t(B) significativo ao nível de 5% de probabilidade.

** = teste t(B) significativo ao nível de 1% de probabilidade.

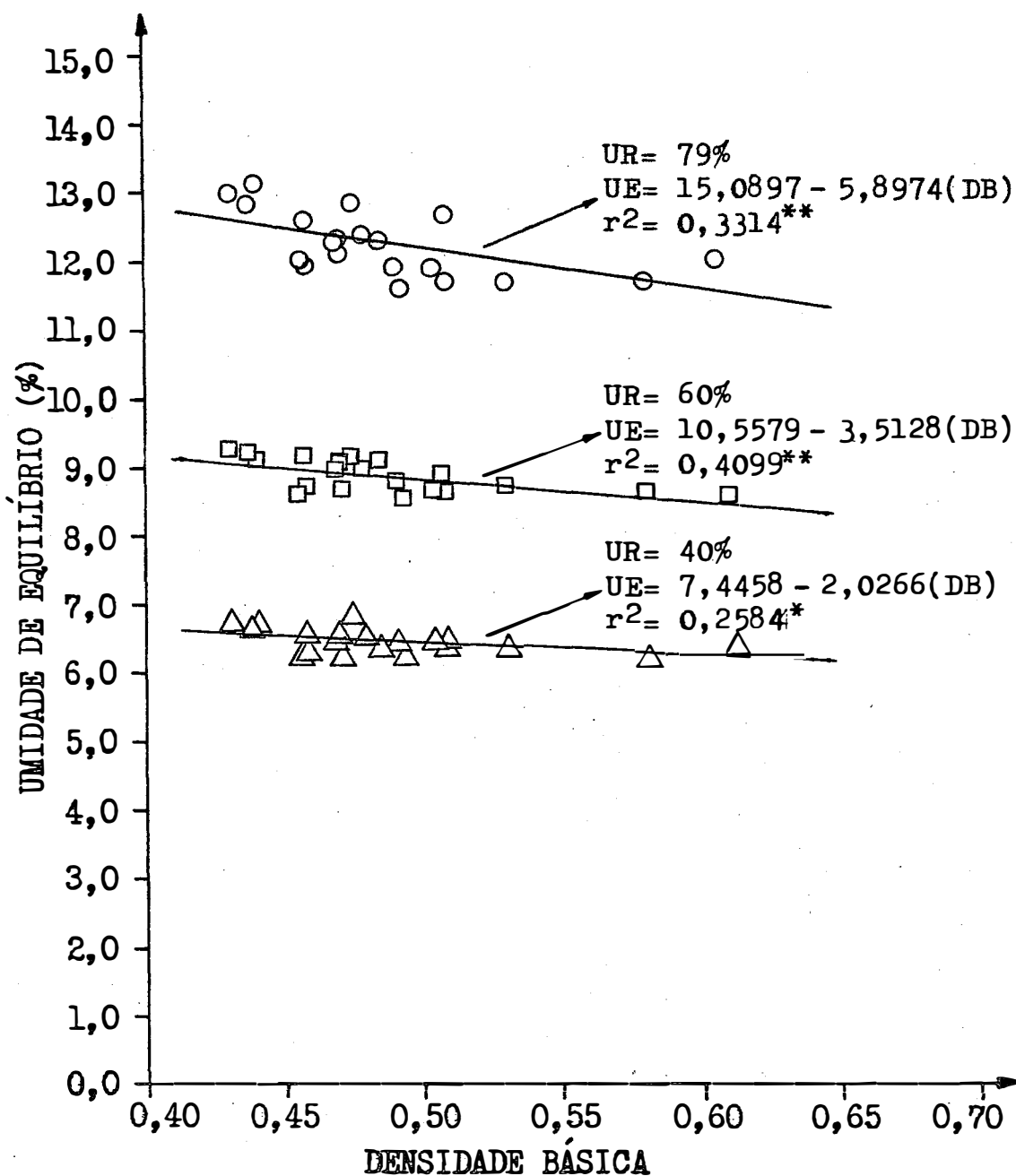


Figura 17. Relação entre a umidade de equilíbrio (UE) e a densidade básica (DB), para madeira de mogno à 50°C de temperatura e umidades relativas (UR) de 40%, 60% e 79%.

* = teste t(B) significativo ao nível de 5% de probabilidade.

** = teste t(B) significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 15. Análise da variância para a correlação entre a umidade de equilíbrio (UE) e a densidade básica (DB), para madeira de mogno em diferentes condições de temperatura (T) e umidade relativa (UR).

Causa de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	r ²
<u>T=40°C, UR=60% (c.v.=2,47%)</u>					
Regressão	1	0,562847	0,562847	7,94**	0,3060**
Resíduo	18	1,276259	0,070903		
Total	19	1,839106			
<u>T=50°C, UR=40% (c.v.=2,47%)</u>					
Regressão	1	0,159804	0,159804	6,27*	0,2584**
Resíduo	18	0,458700	0,025483		
Total	19	0,618504			
<u>T=50°C, UR=60% (c.v.=2,22%)</u>					
Regressão	1	0,480090	0,480090	12,50**	0,4099**
Resíduo	18	0,691211	0,038401		
Total	19	1,171301			
<u>T=50°C, UR=79% (c.v.=3,19%)</u>					
Regressão	1	1,353160	1,353160	8,92**	0,3314**
Resíduo	18	2,730512	0,151695		
Total	19	4,083672			
<u>T=60°C, UR=60% (c.v.=3,66%)</u>					
Regressão	1	0,561994	0,561994	5,66*	0,2392**
Resíduo	18	1,787892	0,099327		
Total	19	2,349886			

c.v.= coeficiente de variação.

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade.

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade.

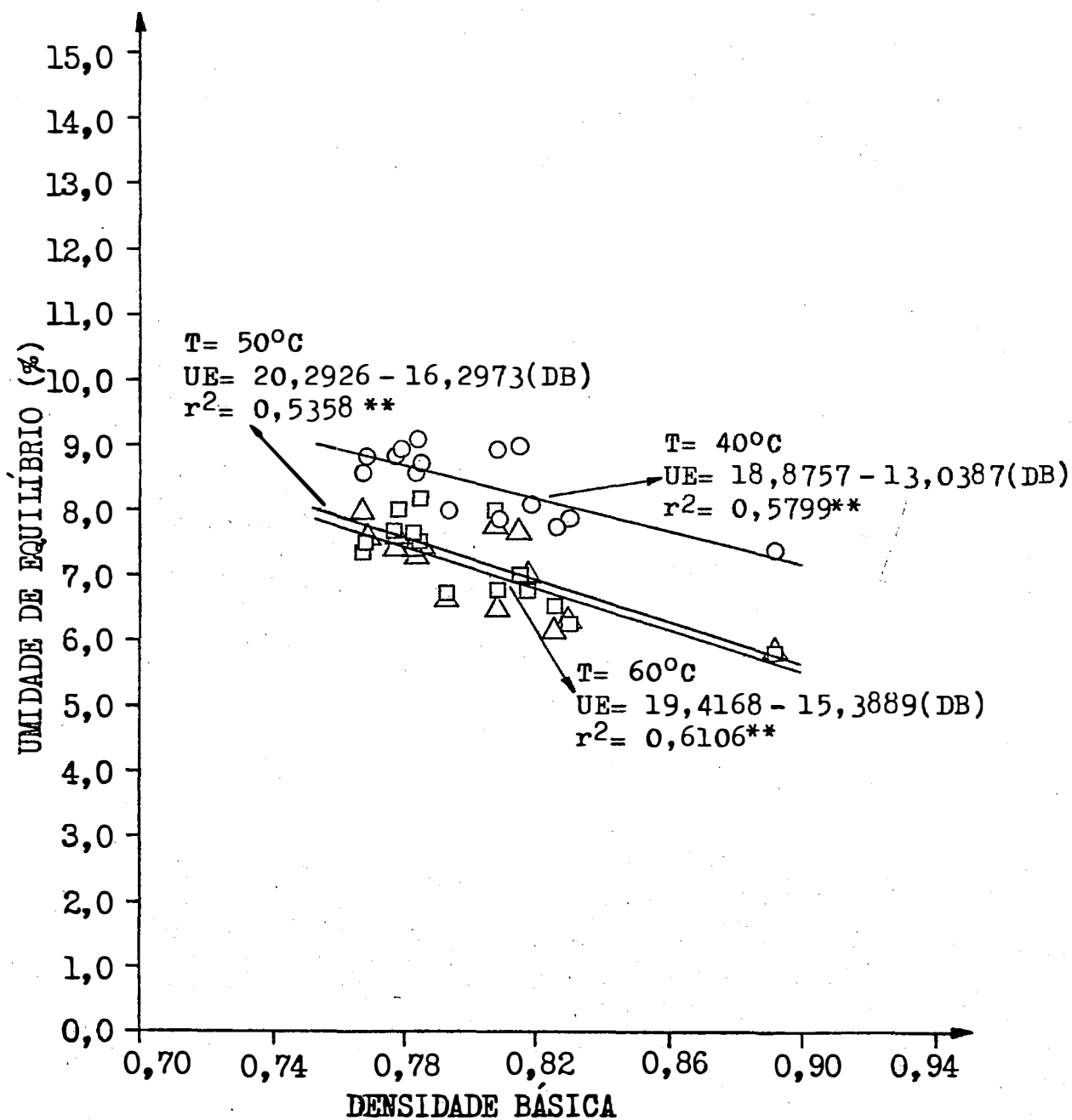


Figura 18. Relação entre a umidade de equilíbrio (UE) e a densidade básica (DB), para madeira de eucalipto citriodora à 60% de umidade relativa e temperaturas (T) de 40°C, 50°C e 60°C.

** = teste t(B) significativo ao nível de 1% de probabilidade.

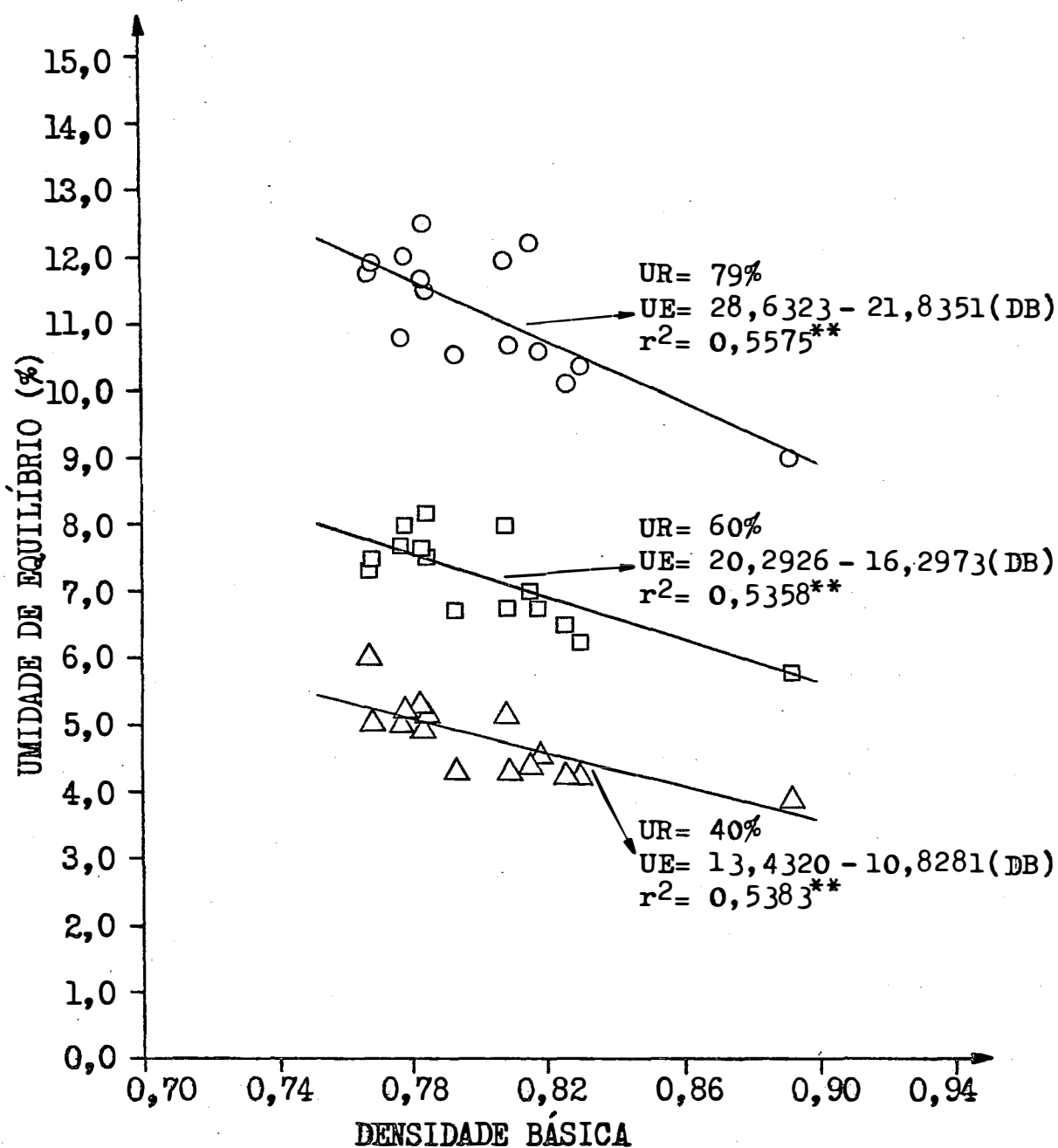


Figura 19. Relação entre a umidade de equilíbrio (UE) e a densidade básica (DB), para madeira de eucalipto citriodora à 50°C de temperatura e umidades relativas (UR) de 40%, 60% e 79%.

** = teste t(B) significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 16. Análise da variância para a correlação entre a umidade de equilíbrio (UE) e a densidade básica (DB), para madeira de eucalipto em diferentes condições de temperatura (T) e umidade relativa (UR).

Causa de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	r ²
<u>T=40°C, UR=60% (c.v.=4,50%)</u>					
Regressão	1	2,572795	2,572795	17,95**	0,5799**
Resíduo	13	1,863807	0,143370		
Total	14	4,436602			
<u>T=50°C, UR=40% (c.v.=7,22%)</u>					
Regressão	1	1,774372	1,774372	15,15**	0,5383**
Resíduo	13	1,522123	0,117086		
Total	14	3,296495			
<u>T=50°C, UR=60% (c.v.=7,18%)</u>					
Regressão	1	4,019458	4,019458	15,00**	0,5358**
Resíduo	13	3,482715	0,267901		
Total	14	7,502173			
<u>T=50°C, UR=79% (c.v.=5,98%)</u>					
Regressão	1	7,215207	7,215207	16,38**	0,5575**
Resíduo	13	5,725958	0,440458		
Total	14	12,941165			
<u>T=60°C, UR=60% (c.v.=5,94%)</u>					
Regressão	1	3,583880	3,583880	20,37**	0,6106**
Resíduo	13	2,286894	0,175915		
Total	14	5,870774			

c.v.= coeficiente de variação.

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade.

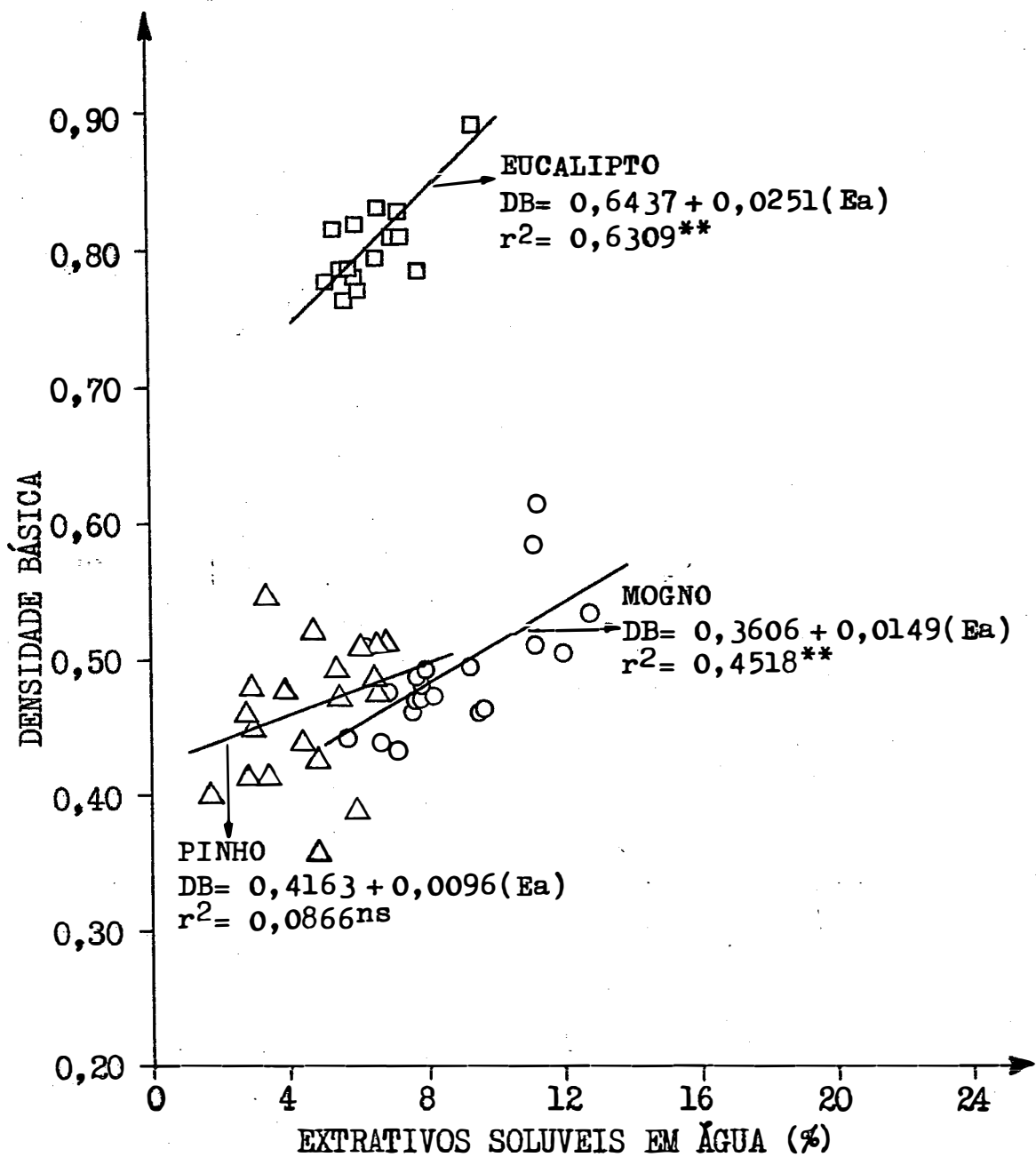


Figura 20. Relação entre a densidade básica (DB) e o teor de extrativos solúveis em água (Ea), para as madeiras de pinho, mogno e eucalipto citriodora.

ns = teste t(B) não significativo.

** = teste t(B) significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 17. Análise da variância para a correlação entre a densidade básica (DB) e o teor de extrativos solúveis em água (Ea), para madeiras de pinho, mogno e eucalipto.

Causa de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	r ²
<u>Pinho (c.v.=10,59%)</u>					
Regressão	1	0,004061	0,004061	1,71 ^{ns}	0,0866 ^{ns}
Resíduo	18	0,042836	0,002380		
Total	19	0,046897			
<u>Mogno (c.v.= 7,04%)</u>					
Regressão	1	0,017576	0,017576	14,83 ^{**}	0,4518 ^{**}
Resíduo	18	0,021330	0,001185		
Total	19	0,038906			
<u>Eucalipto (c.v.=2,58%)</u>					
Regressão	1	0,009548	0,009548	22,20 ^{**}	0,6309 ^{**}
Resíduo	13	0,005585	0,000430		
Total	14	0,015133			

c.v.= coeficiente de variação.

ns = não significativo.

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade.

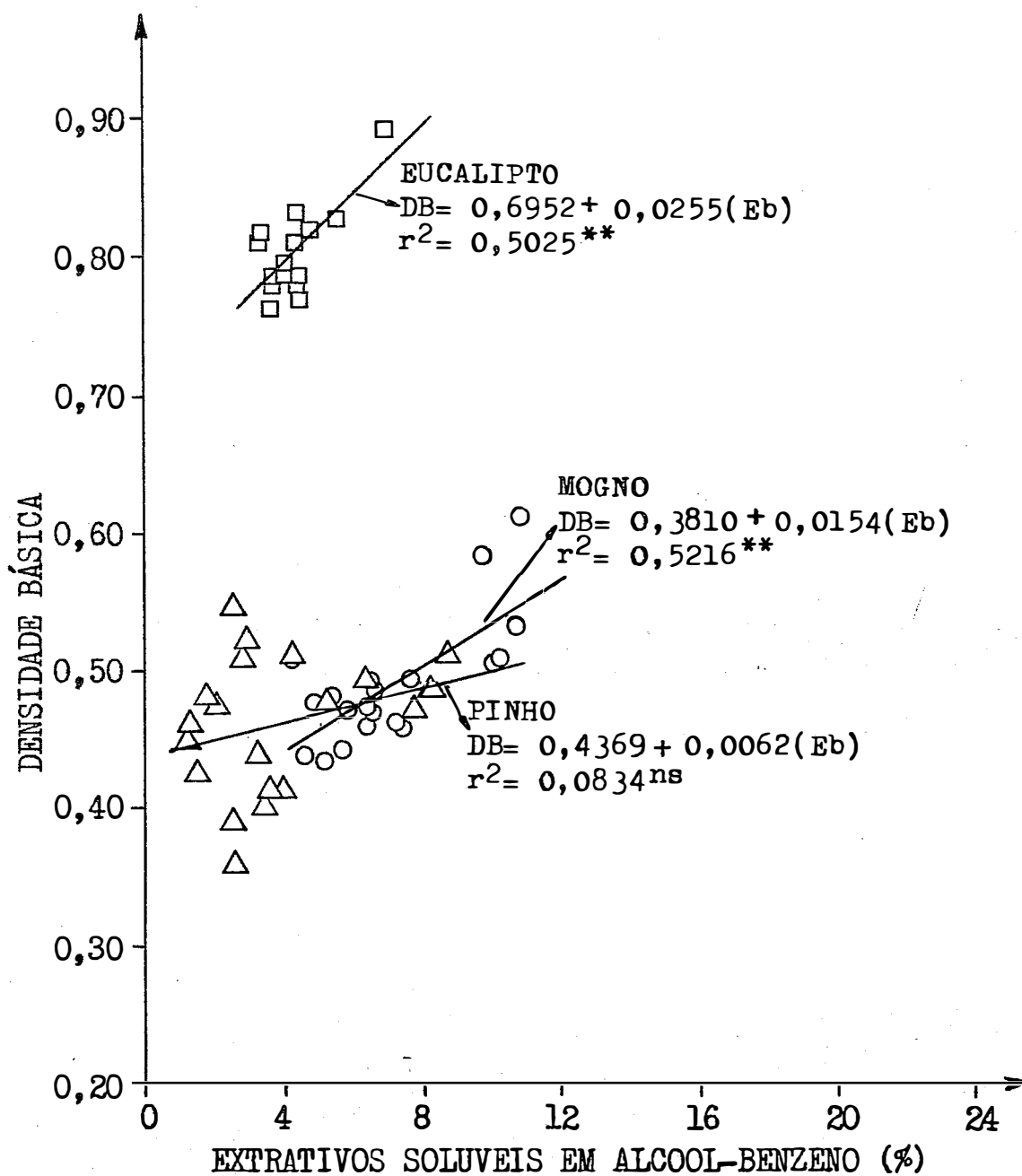


Figura 21. Relação entre a densidade básica (DB) e o teor de extrativos solúveis em álcool-benzeno (Eb), para as madeiras de pinho, mogno e eucalipto citriodora.
 ns = teste t(B) não significativo.
 ** = teste t(B) significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 18. Análise da variância para a correlação entre a densidade básica (DB) e o teor de extrativos solúveis em álcool-benzeno (Eb), para madeiras de pinho, mogno e eucalipto.

Causa de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	r ²
<u>Pinho (c.v.=10,61%)</u>					
Regressão	1	0,003909	0,003909	1,64 ^{ns}	0,0834 ^{ns}
Resíduo	18	0,042988	0,002388		
Total	19	0,046897			
<u>Mogno (c.v.= 6,58%)</u>					
Regressão	1	0,020291	0,020291	19,62 ^{**}	0,5216 ^{**}
Resíduo	18	0,018615	0,001034		
Total	19	0,038906			
<u>Eucalipto (c.v.= 3,00%)</u>					
Regressão	1	0,007605	0,007605	13,13 ^{**}	0,5025 ^{**}
Resíduo	13	0,007528	0,000579		
Total	14	0,015133			

c.v.= coeficiente de variação.

ns = não significativo.

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Como se pode inferir do exame das Figuras 2 a 13 e Tabelas 8 a 13, o aumento no teor de extrativos provocou um decréscimo na umidade de equilíbrio, dentro de cada espécie estudada e independentemente de variações na temperatura e umidade relativa.

Observando-se as Figuras 2,3,8 e 9, e as Tabelas 8 e 11, pode-se constatar que para o pinho houve uma correlação mais elevada da umidade de equilíbrio com o teor de extrativos solúveis em álcool-benzeno, ao passo que para o mogno e o eucalipto citriodora os coeficientes de determinação (r^2) são semelhantes para os dois diferentes conteúdos de extrativos considerados, conforme mostram as Tabelas 9,10,12, e 13.

A influência dos extrativos foi mais acentuada para o eucalipto citriodora (maior inclinação da linha de regressão), ao contrário do que era esperado. De acordo com a literatura consultada, previa-se que o efeito fosse mais acentuado na espécie com maior porcentagem de extrativos, que no presente caso seria o mogno. Por outro lado, o coeficiente de determinação mais elevado ($r^2 = 0,8849$), significando o ajustamento mais preciso entre os dados experimentais e a regressão teórica, foi obtido para o pinho, espécie que dentre as três estudadas continha o menor teor de extrativos. Essa observação é ilustrada pela Figura 22.

Os resultados mostram que dentro de uma mesma espécie, um aumento no teor de extrativos provoca uma redução na umidade de equilíbrio, mas o fato de uma espécie ser rica em extrativos não implica necessariamente em uma correlação mais elevada ou mais acentuada.

Observa-se também, para as três espécies estu-

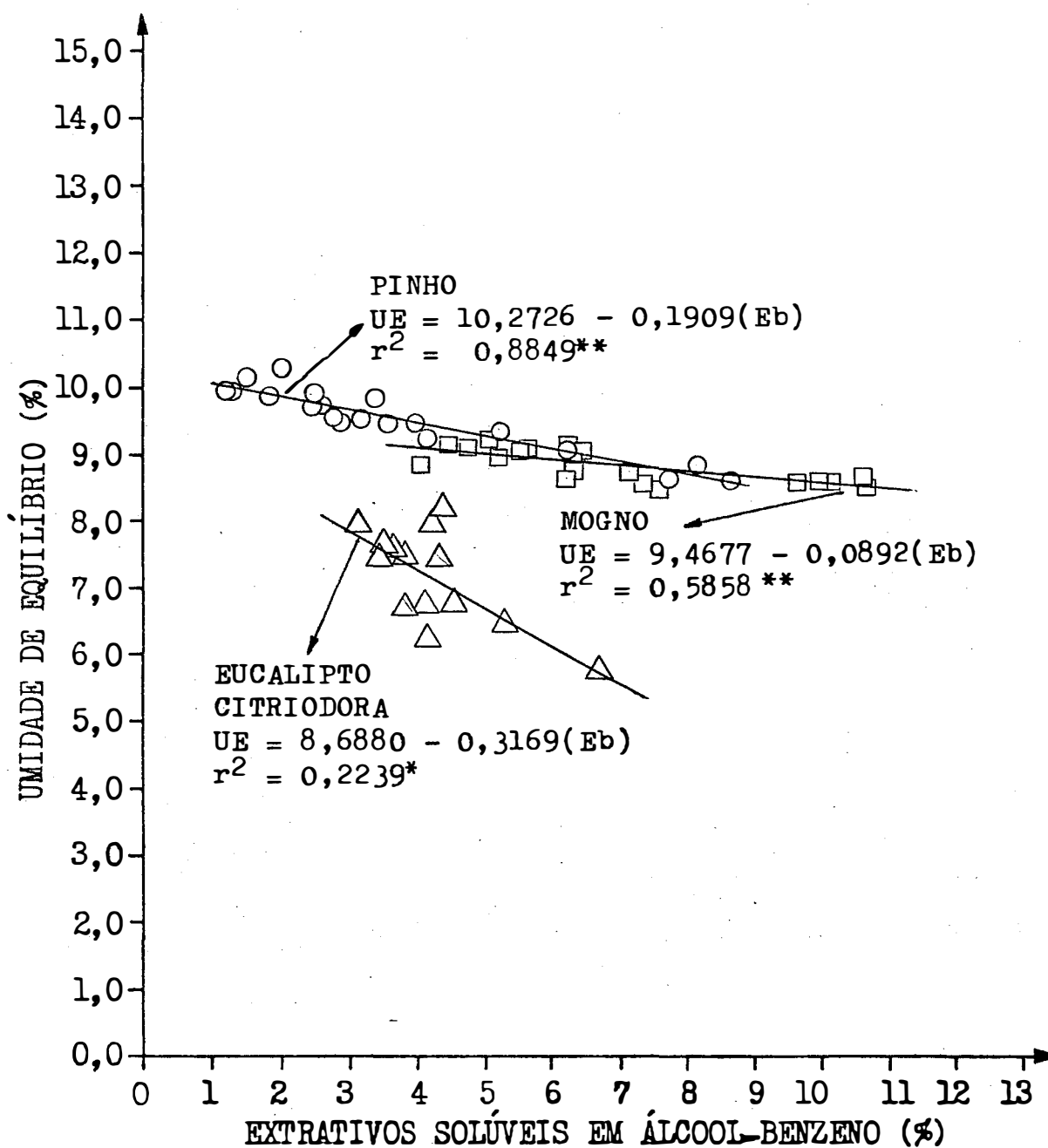


Figura 22. Relacionamento entre a umidade de equilíbrio(UE) e o teor de extrativos soluveis em alcool-benzeno(Eb) para as madeiras de pinho, mogno e eucalipto citriodora. A umidade de equilíbrio corresponde às condições de 50°C de temperatura e 60% de umidade relativa.

* = teste t(B) significativo ao nível de 5% de probabilidade.

** = teste t(B) significativo ao nível de 1% de probabilidade.

dadas, que a variação da temperatura para uma mesma umidade relativa não altera o efeito dos extrativos na higroscopicidade da madeira, ocorrendo apenas uma diminuição da umidade de equilíbrio em função do aumento da temperatura (Figuras 2, 4, 6, 8, 10, 12). Todavia, mantendo-se constante a temperatura, a redução da umidade de equilíbrio causada pelo acréscimo no teor de extrativos torna-se mais acentuada à medida em que aumente a umidade relativa (Figuras 3, 5, 7, 9, 11 e 13).

Analisando-se cada espécie isoladamente pode se concluir que o acréscimo do teor de extrativos sempre provoca um decréscimo na umidade de equilíbrio. Os extrativos soluveis em álcool-benzeno tem uma correlação mais elevada do que os solúveis em água na redução da higroscopicidade do pinho. Para o mogno ocorre o inverso, com o efeito dos extrativos solúveis em água apresentando uma correlação ligeiramente maior. No eucalipto citriodora não ocorrem diferenças nas correlações apresentadas pelos dois tipos de componentes estranhos.

Em termos quantitativos o efeito depressivo na umidade de equilíbrio é o mesmo tanto para os extrativos soluveis em álcool-benzeno como solúveis em água. A redução na higroscopicidade foi observada na seguinte ordem decrescente : eucalipto citriodora, pinho e mogno. A 60% de umidade relativa, um aumento de 4% no conteúdo de extrativos solúveis em alcool-benzeno ou em água provocará um decréscimo de aproximadamente 2,0%, 0,8% e 0,4% nas umidades de equilíbrio do eucalipto citriodora, do pinho e do mogno, respectivamente, conforme mostram as Figuras 2, 4, 6, 8, 10 e 12.

Não foi constatado efeito da densidade básica na umidade de equilíbrio do pinho, mas para o mogno e o euca-

lipto citriodora esse efeito acentua-se em ordem crescente (Figuras 14 a 19 e Tabelas 14 a 16). Pode-se perceber também que essa relação é semelhante à dos extrativos, apresentando inclusive as mesmas influências da temperatura e da umidade relativa.

Contudo, na observação das Figuras 20 e 21 e das Tabelas 17 e 18, pode-se verificar para o mogno e o eucalipto citriodora a correlação positiva do teor de extrativos com a densidade básica, não existindo essa relação para o pinho. Em outras palavras, quanto maior a correlação da densidade básica com o teor de extrativos, mais elevado o seu efeito na umidade de equilíbrio. A Figura 23 é um exemplo típico do relacionamento entre a densidade básica, o teor de extrativos e a umidade de equilíbrio.

Assim, conclue-se que o efeito da densidade básica na umidade de equilíbrio da madeira é resultante da sua correlação com o teor de extrativos.

A densidade básica do pinho não está correlacionada com o teor de extrativos (Figuras 20 e 21), confirmando a afirmação de VERMAAS(1975), segundo o qual a contribuição dos extrativos no aumento do peso seco da madeira é insignificante. Porém, os resultados obtidos com o eucalipto citriodora e o mogno são totalmente contraditórios, conforme pode-se observar nas Tabelas 17 e 18. Um aumento de 1% no teor de extrativos acarreta um aumento de 0,015 na densidade básica do mogno e 0,025 para o eucalipto citriodora.

MC MILLIN(1968), estudando a composição química da madeira de Pinus taeda, verificou que na parte central da tora, correspondente aos primeiros 10 anos de crescimento da árvore, a densidade básica estava positivamente correla-

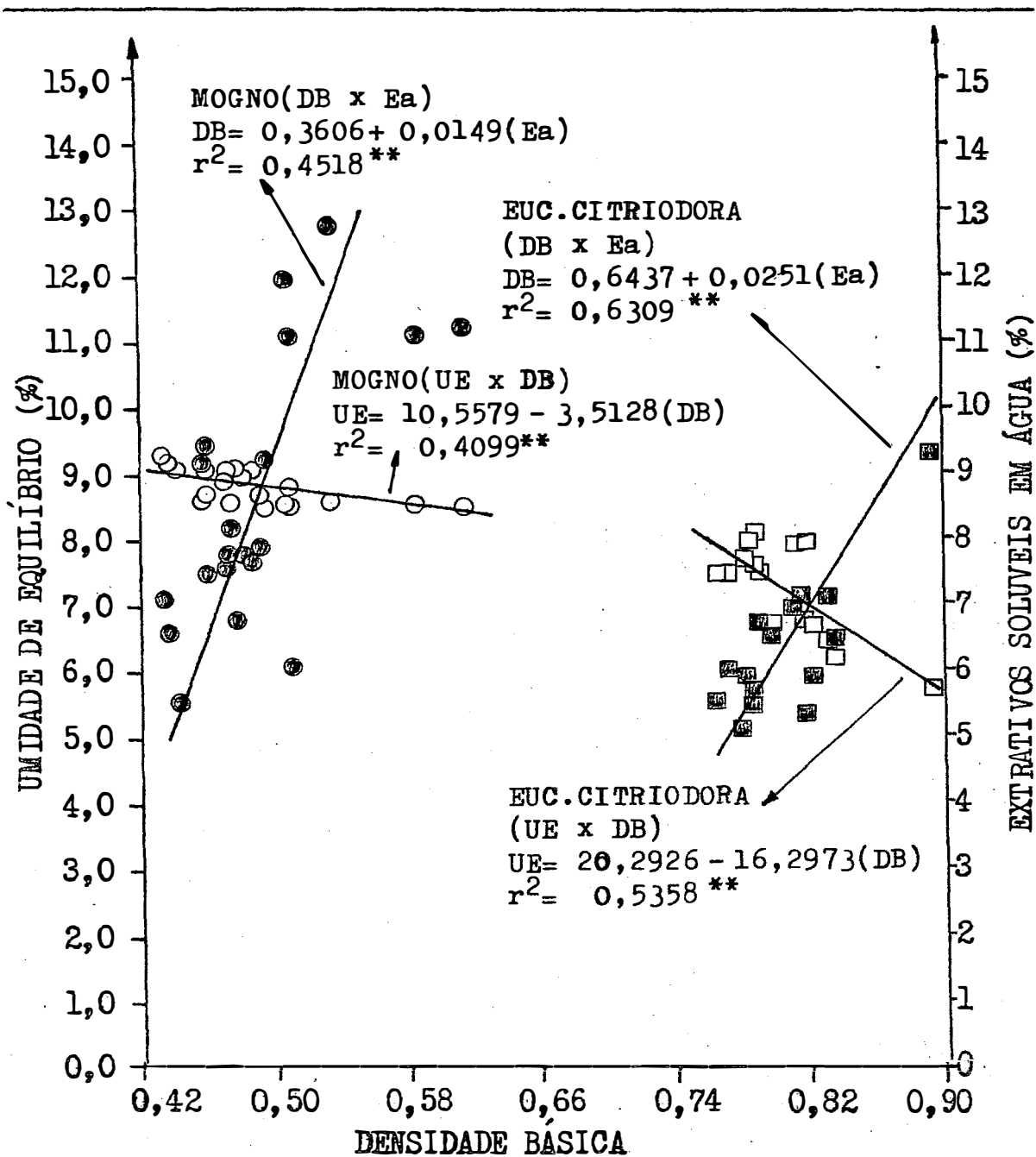


Figura 23. Relacionamento entre a umidade de equilíbrio(UE), o teor de extrativos soluveis em água (Ea), e a densidade básica (DB), para as madeiras de pinho e eucalipto citriodora. A umidade de equilíbrio corresponde às condições de 50°C de temperatura e 60% de umidade relativa.

** = teste t(B) sidnificativo ao nivel de 1% de probabilidade.

cionada com o teor de extrativos. Nas partes intermediária e externa da tora não foram encontradas diferenças na densidade básica em função de variações nos teores de extrativos.

Coincidentemente o trabalho conduzido por VERMAAS(1975), foi com madeira de Pinus pinaster. Estes fatos, aliados à afirmação de HIGGINS et alii(1973), de que o conteúdo e distribuição dos extrativos é uma das características das folhosas que acredita-se exercer influência sobre a densidade básica, sugerem a possibilidade de existir a influência do teor de extrativos na densidade básica apenas para as folhosas.

As Figuras 24 a 26 apresentam as isotermas higroscópicas de adsorção experimentais, determinadas com base na teoria de Hailwood e Horrobin, bem como as curvas de adsorção monomolecular e polimolecular. A isoterma obtida com o auxílio da equação proposta por SIMPSON(1971) consta da Figura 27.

A Tabela 19 mostra os parâmetros K_1 , K_2 e M , sendo que as umidades de equilíbrio calculadas através desses parâmetros e utilizadas na elaboração das isotermas constam da Tabela 20. Os valores de umidade adsorvida nas formas de hidrato e solução, nos quais baseiam-se as curvas de adsorção, são apresentados nas Tabelas 21 e 22 respectivamente.

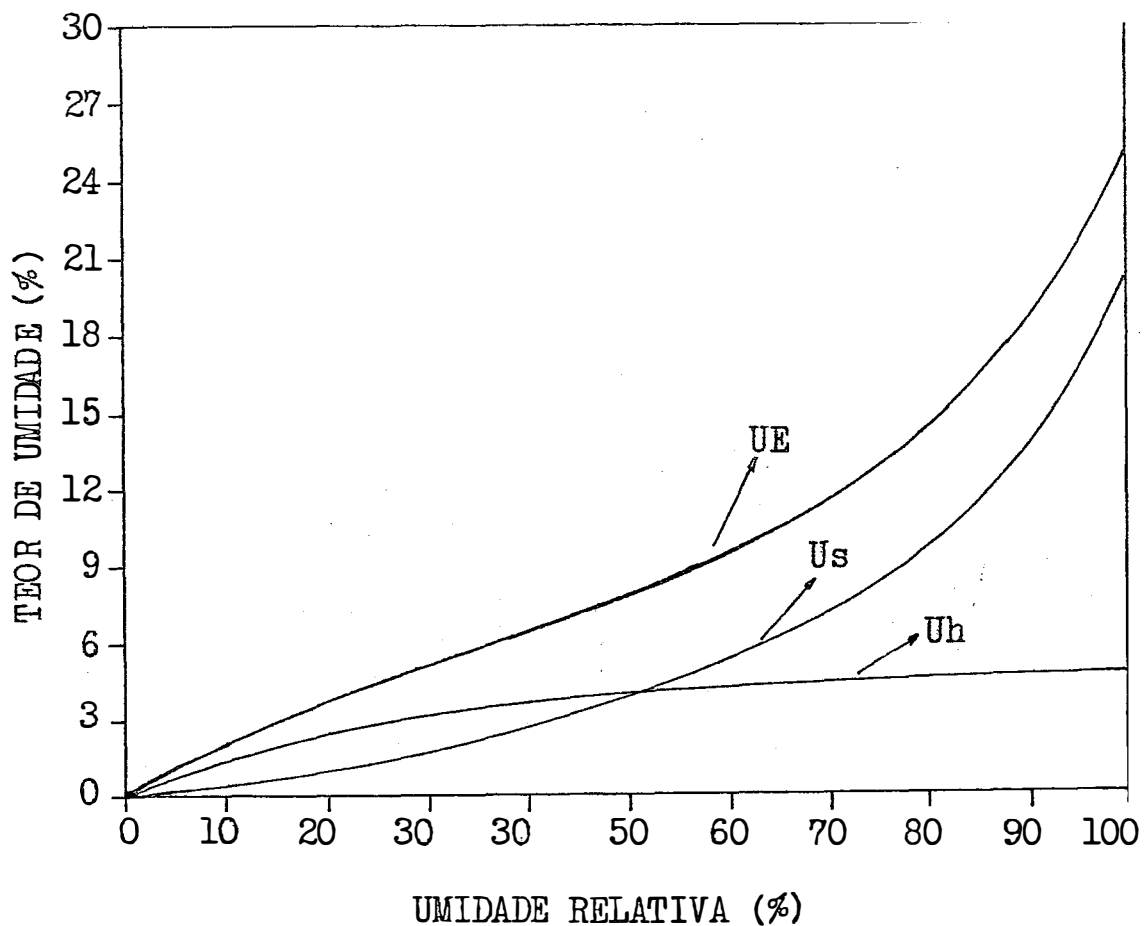


Figura 24. Isotherma higroscópica de adsorção (UE) para madeira de pinho à temperatura de 50°C, com as curvas de adsorção de umidade na forma de hidrato (Uh) e na solução (Us).

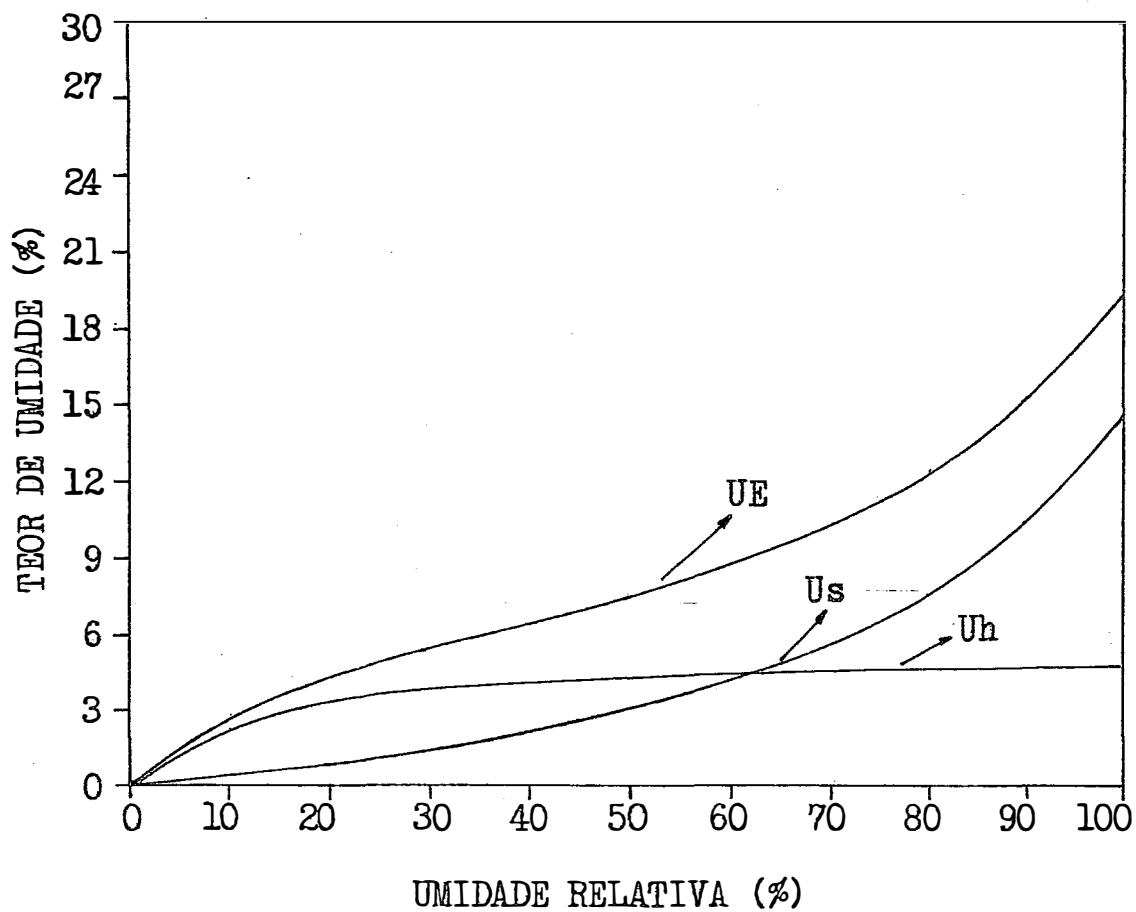


Figura 25. Isotherma higroscópica de adsorção (UE) para madeira de mogno à temperatura de 50°C, com as curvas de adsorção de umidade na forma de hidrato (Uh) e na solução (Us).

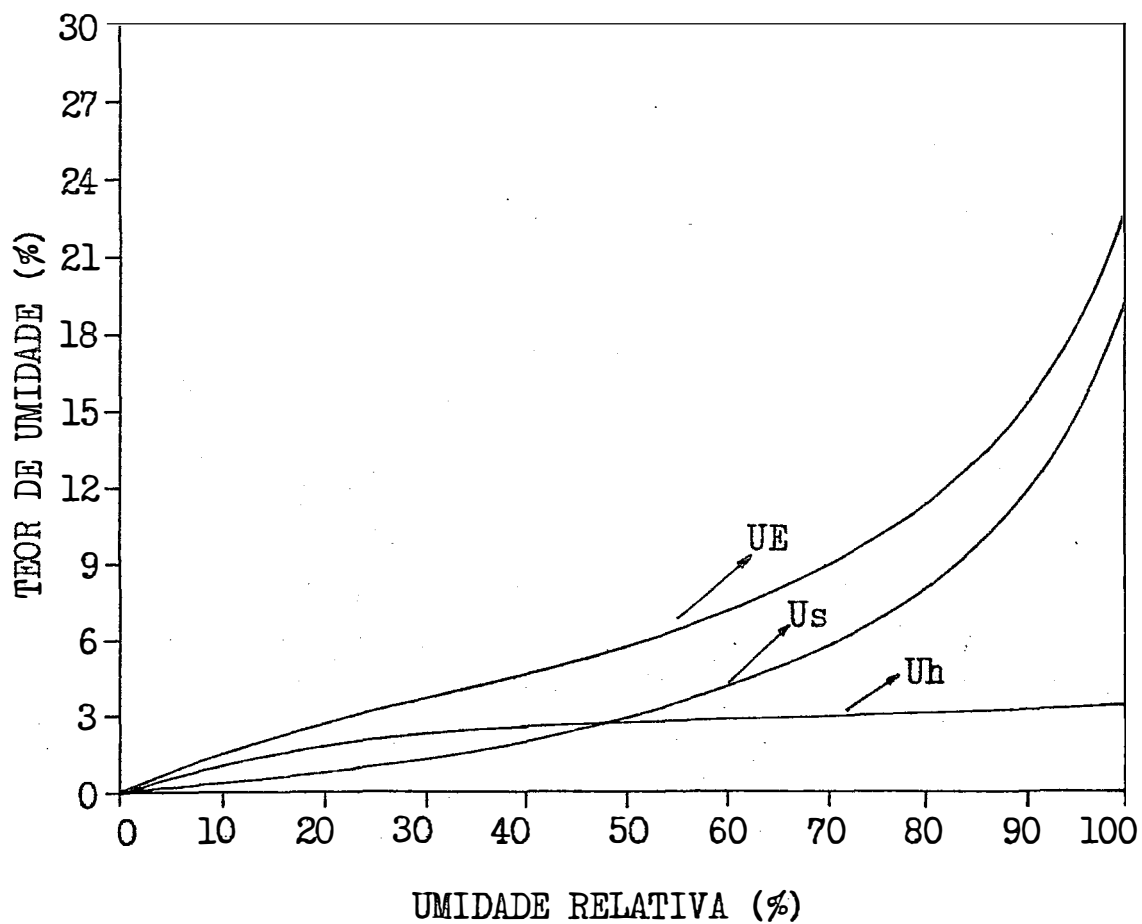


Figura 26. Isotherma higroscópica de adsorção (UE) para madeira de eucalipto citriodora à temperatura de 50°C, com as curvas de adsorção de umidade na forma de hidrato (Uh) e na solução (Us).

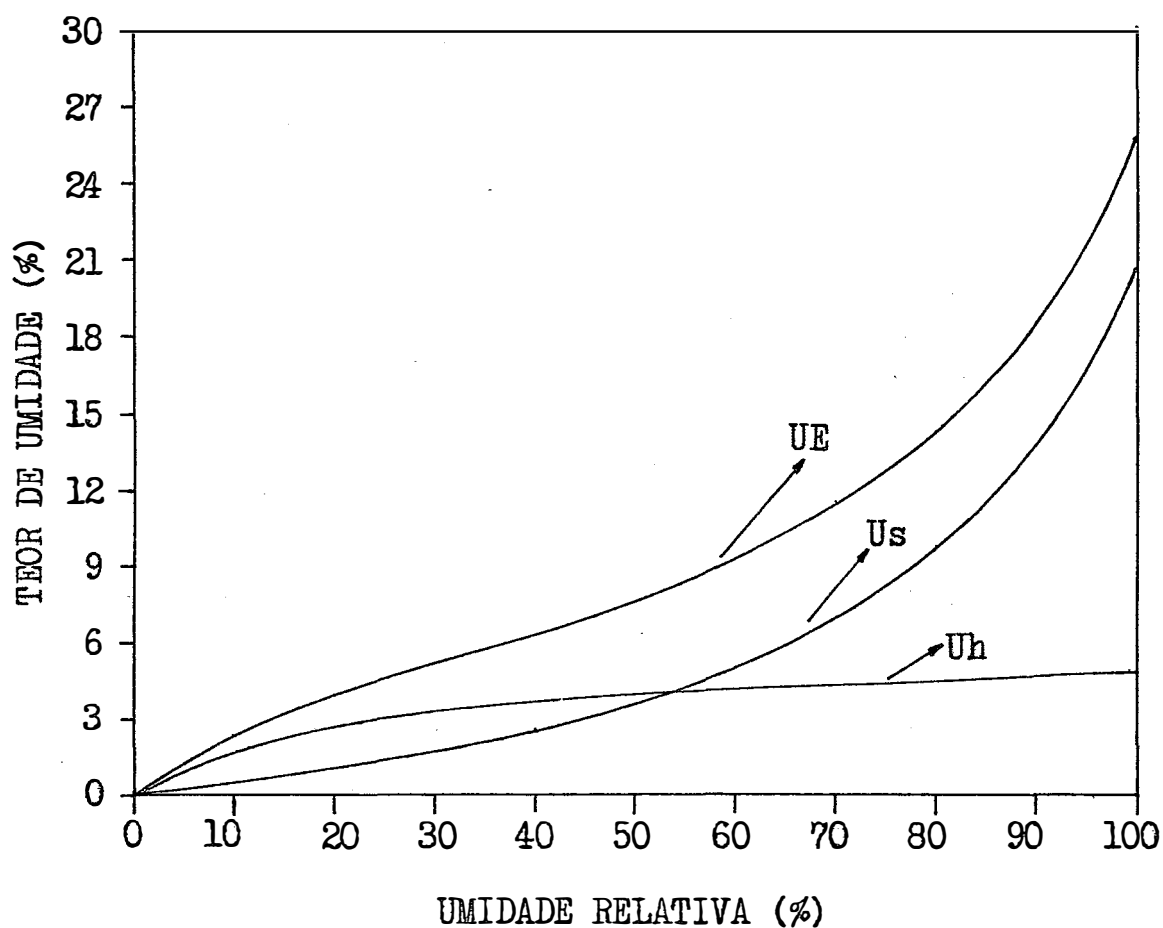


Figura 27. Isotherma higroscópica de adsorção (UE) determinada segundo a equação de Simpson para a temperatura de 50°C, com as curvas de adsorção de umidade na forma de hidrato (Uh) e na solução (Us).

Tabela 19. Parâmetros K_1 , K_2 e M da teoria de Hailwood e Horrobin, obtidos através de dados experimentais de adsorção à temperatura de 50°C , para as madeiras de pinho, mogno e eucalipto citriodora, e segundo a equação de Simpson.

	K_1	K_2	M
Pinho	4,530	0,7607	285,990
Mogno	10,405	0,7227	322,864
Euc. citriodora	4,625	0,8155	416,446
Simpson	5,871	0,7777	304,429

Tabela 20. Umidades de equilíbrio das isotermas higroscópicas de adsorção à temperatura de 50°C , para as madeiras de pinho, mogno e eucalipto citriodora, e segundo a equação de Simpson.

UMIDADE RELATIVA (%)	UMIDADE DE EQUILÍBRIO (%)			
	Pinho	Mogno	Euc. citriodora	Simpson
10	2,13	2,83	1,57	2,35
20	3,70	4,29	2,70	3,91
30	5,06	5,41	3,69	5,21
40	6,40	6,45	4,69	6,49
50	7,85	7,56	5,80	7,87
60	9,53	8,83	7,14	9,49
70	11,62	10,39	8,88	11,55
80	14,40	12,42	11,34	14,35
90	18,42	15,23	15,26	18,50
100	24,89	19,45	22,52	25,45

Tabela 21. Valores da umidade adsorvida na forma de hidrato (adsorção monomolecular) à temperatura de 50°C para as madeiras de pinho, mogno e eucalipto citriodora, e segundo a equação de Simpson.

UMIDADE RELATIVA (%)	UMIDADE ADSORVIDA NA FORMA DE HIDRATO (%)			
	Pinho	Mogno	Euc.citriodora	Simpson
10	1,61	2,39	1,18	1,85
20	2,57	3,35	1,86	2,82
30	3,20	3,86	2,29	3,42
40	3,65	4,18	2,60	3,82
50	3,98	4,40	2,82	4,11
60	4,24	4,56	3,00	4,33
70	4,45	4,69	3,13	4,50
80	4,62	4,78	3,25	4,64
90	4,75	4,86	3,34	4,75
100	4,88	4,92	3,42	4,85

Tabela 22. Valores da umidade adsorvida na solução (adsorção polimolecular) à temperatura de 50°C para as madeiras de pinho, mogno e eucalipto citriodora, e segundo a equação de Simpson.

UMIDADE RELATIVA (%)	UMIDADE ADSORVIDA NA SOLUÇÃO (%)			
	Pinho	Mogno	Euc.citriodora	Simpson
10	0,52	0,44	0,39	0,50
20	1,13	0,94	0,84	1,09
30	1,86	1,55	1,40	1,79
40	2,75	2,27	2,09	2,67
50	3,87	3,16	2,98	3,76
60	5,29	4,27	4,14	5,16
70	7,17	5,70	5,75	7,05
80	9,78	7,64	8,09	9,71
90	13,65	10,37	11,92	13,75
100	20,01	14,53	19,10	20,60

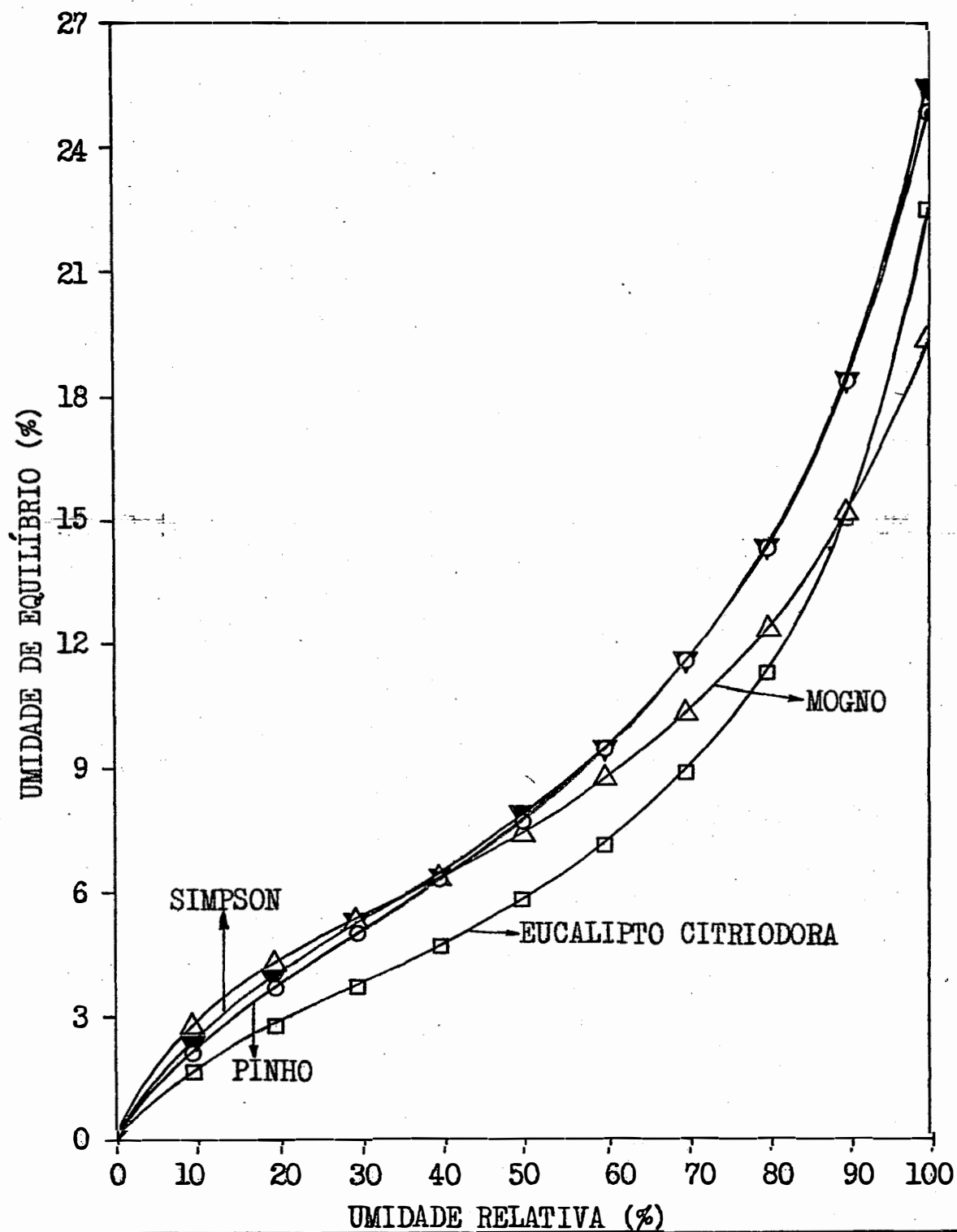


Figura 28. Isotermas higroscópicas de adsorção determinadas experimentalmente para as madeiras de pinho, mogno e eucalipto citriodora, e segundo a equação de Simpson, à temperatura de 50°C.

A equação de Simpson foi desenvolvida com base nas tabelas do Forest Products Laboratory. Essas tabelas reportam dados experimentais de Picea sitchensis e são normalmente utilizadas na elaboração de programas de secagem para qualquer espécie. Na Figura 28 percebe-se que a isoterma obtida com o auxílio da equação de Simpson assemelha-se bastante à isoterma para madeira de pinho, sendo que para o mogno a semelhança é razoável até aproximadamente 50% de umidade relativa. Acima desse ponto a umidade de equilíbrio teórica alcança valores progressivamente maiores em relação à experimental. O eucalipto citriodora, por sua vez, mostrou valores de equilíbrio inferiores aos teóricos em toda a extensão da isoterma.

Esses resultados confirmam as afirmações de PECK(1965), e ORMAN(1966), dentre outros, de que as tabelas e fórmulas comumente utilizadas no cálculo da umidade de equilíbrio para a secagem de madeira em estufas não podem ser utilizadas indistintamente para qualquer espécie, pois elas apresentam valores médios e podem induzir a erros durante a secagem.

Utilizando-se como exemplo o programa de secagem sugerido por PRATT(1974) para Eucalyptus spp.(programa B, pag. 132), pode-se calcular o erro causado pela utilização de tabelas com valores médios da umidade de equilíbrio. O referido programa recomenda regular as condições do secador para 50°C de temperatura e 60% de umidade relativa quando a madeira em secagem atingir 25% de umidade. A umidade de equilíbrio teórica correspondente a essas condições seria de 9,59%, resultando em um gradiente de secagem igual a 2,6. Na realidade os dados experimentais mostram que a umi-

dade de equilíbrio para o eucalipto citriodora será de 7,14%, significando um gradiente de secagem igual a 3,5. A utilização da equação de Simpson levaria a um aumento de 35% no gradiente de secagem, com o conseqüente aumento na rapidez de secagem e na possibilidade de surgirem defeitos na madeira.

Essas considerações provam não só a necessidade de estudos mais profundos sobre o relacionamento água-madeira das espécies amplamente utilizadas em marcenaria e construção civil, como também o erro em que se pode incorrer utilizando as tradicionais tabelas do Forest Products Laboratory ou a equação proposta por SIMPSON(1971), na estimativa da unidade de equilíbrio para madeiras que não apresentam características semelhantes à espécie que foi utilizada na elaboração dessas tabelas.

Ainda na Figura 28 observa-se que o eucalipto citriodora apresenta umidades de equilíbrio inferiores à do mogno até 90% de umidade relativa, quando inverte-se a situação. Analisando-se então a umidade de saturação das fibras para as três espécies nota-se que quanto maior o conteúdo de extrativos de uma determinada espécie, menor o seu teor de umidade, corroborando o conceito geral sobre o efeito dos extrativos na umidade de equilíbrio.

Embora seja bastante difundido e aceito o conceito de que espécies ricas em extrativos possuem baixa higroscopicidade, WANGAARD e GRANADOS(1967) já haviam demonstrado que para umidades relativas baixas e intermediárias esse conceito não é válido, e que a diferença na higroscopicidade devido à retirada dos extrativos da madeira sempre era acentuada para altas umidades relativas.

Os resultados obtidos comprovam que a ação dos

extrativos como material de enchimento ocupando locais que estariam disponíveis para a adsorção/dessorção da água, acentua-se quando a umidade relativa é superior a 90%, e que a umidade de saturação das fibras tende a correlacionar-se negativamente com o teor de extrativos para diferentes espécies.

O estudo das Figuras 29 e 30, e Tabelas 21 e 22, permite considerar a possibilidade da baixa higroscopicidade do eucalipto citriodora, para umidades relativas inferiores a 90%, ser explicada pela reduzida adsorção monomolecular de umidade, pois sua adsorção polimolecular é semelhante à do mogno até 80% de umidade relativa. O mogno, que apresenta uma curva de adsorção de água na solução inferior à do pinho em toda sua amplitude e inferior à do eucalipto citriodora para umidades relativas superiores a 80%, tem sua curva de adsorção na forma de hidrato superior às outras espécies até 100% de umidade relativa.

Provavelmente, a maior parte dos extrativos do eucalipto citriodora estariam depositados nas superfícies das paredes celulares restringindo a adsorção da água como hidrato, e os extrativos contidos no interior das paredes celulares esgotam a sua capacidade de enchimento com umidades relativas de aproximadamente 80%, a partir do que há um acentuado aumento na adsorção polimolecular. Por outro lado, os extrativos do mogno estariam concentrados no interior da parede celular, o que explicaria a alta adsorção monomolecular e baixa adsorção de água na solução. O pinho, além de ter uma quantidade de extrativos pequena, deve ter a maior parte deles depositada nas superfícies das paredes celulares, o que explicaria suas curvas de adsorção monomolecular e polimolecular.

Esses resultados mostram que o efeito dos ex-

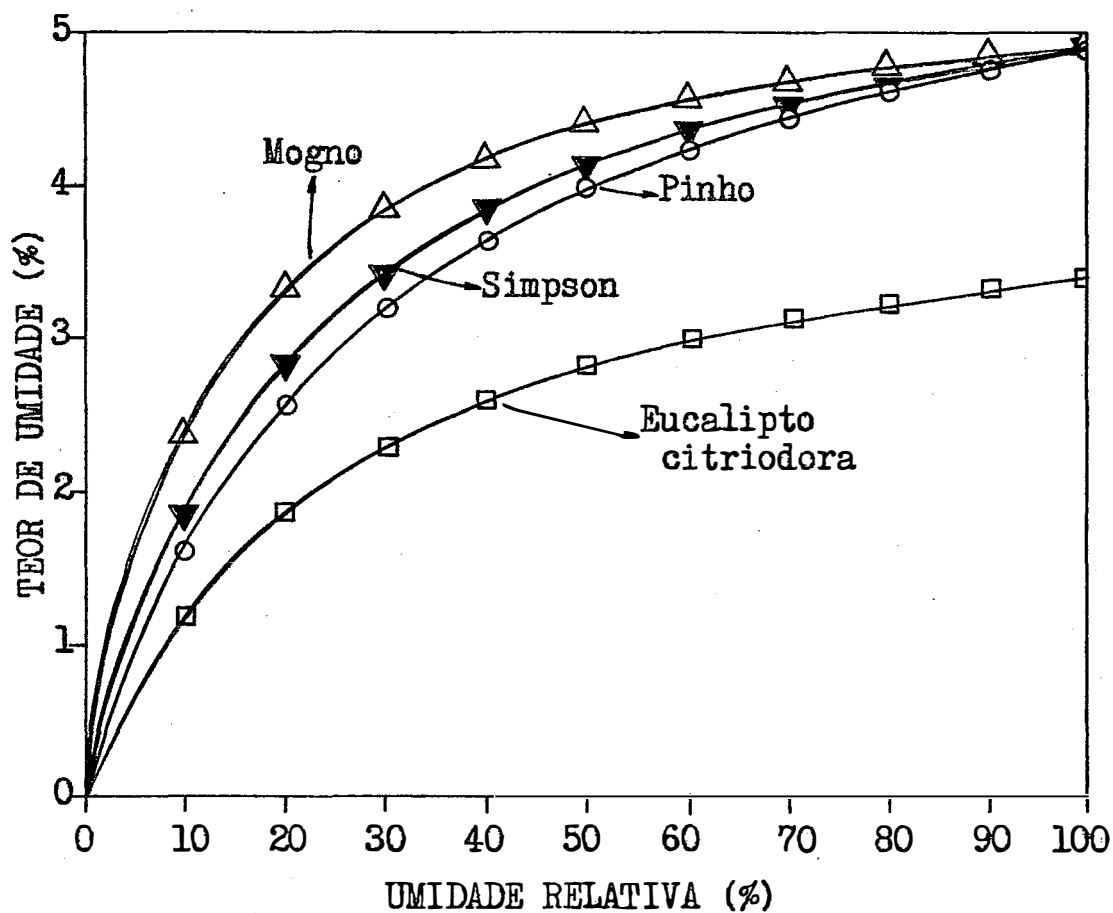


Figura 29. Curvas de adsorção de umidade na forma de hidrato (adsorção monomolecular) determinadas experimentalmente para as madeiras de pinho, mogno e eucalipto citriodora, e segundo a equação de Simpson, à temperatura de 50°C.

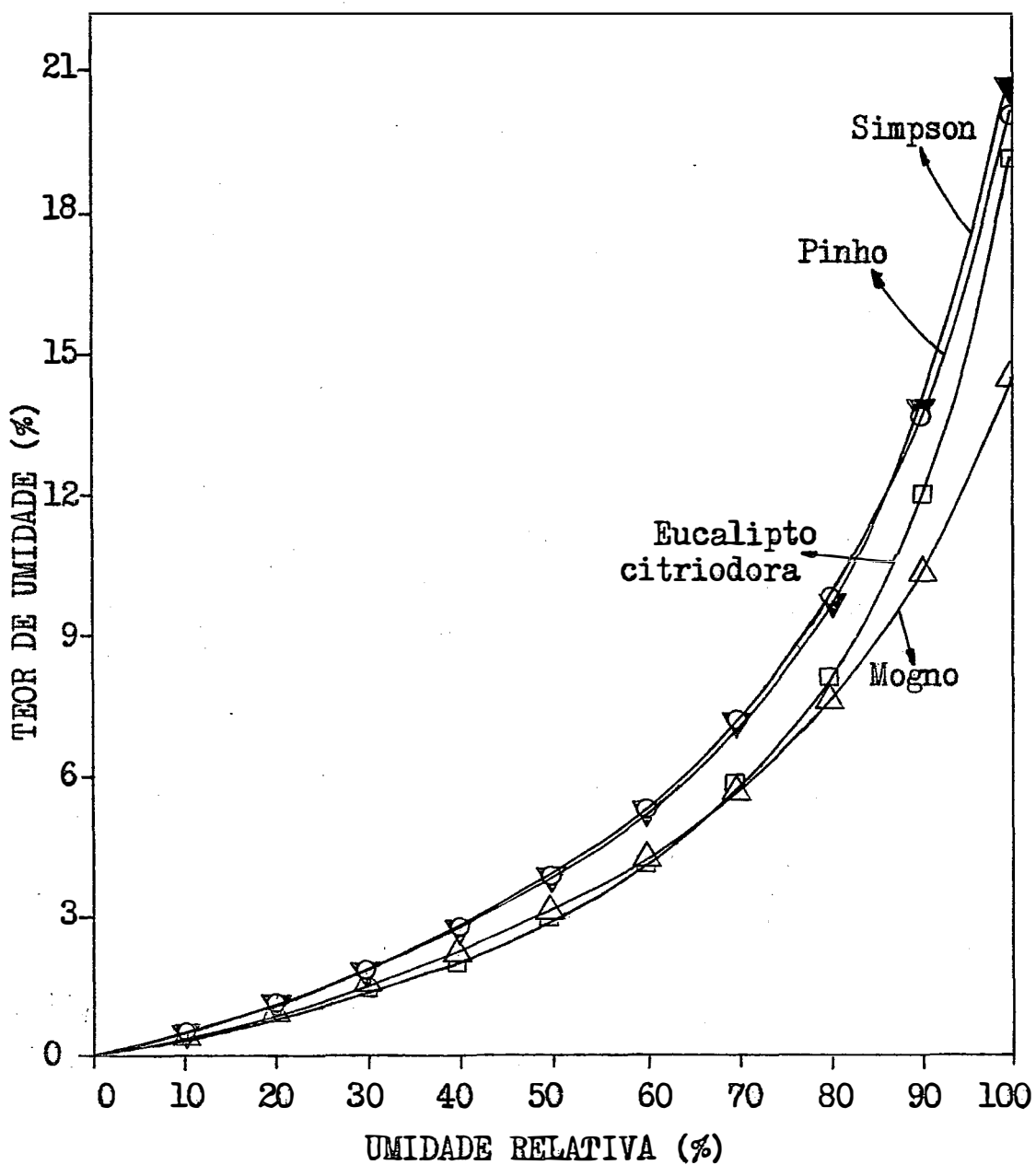


Figura 30. Curvas de adsorção de umidade na solução (adsorção polimolecular) determinadas experimentalmente para as madeiras de pinho, mogno e eucalipto citriodora, e segundo a equação de Simpson, à temperatura de 50°C.

trativos pode ocorrer tanto na adsorção na forma de hidrato como na solução, embora não tenha sido possível verificar qual classe de extrativos (solúveis em água ou em álcool-benzeno) que atua nas diferentes formas de adsorção.

Analisando-se em conjunto os resultados obtidos para as três espécies, conclui-se que o teor de extrativos não é fator dominante na relação água-madeira, pois sua contribuição varia com a espécie e nem sempre a madeira com maior teor de extrativos é a que apresenta menor higroscopicidade, principalmente para condições de umidade relativa inferiores a 90%. O conteúdo de extrativos reduz tanto a adsorção monomolecular como a polimolecular. ~~Esse efeito acentua-se~~ quando a madeira está higroscopicamente saturada, pois para as espécies estudadas a maior porcentagem de extrativos correspondeu à menor umidade de saturação das fibras, e vice-versa.

As Tabelas 23 e 24 permitem estudar o relacionamento entre a umidade de equilíbrio, a umidade adsorvida na forma de hidrato, a umidade adsorvida na solução e o valor calculado para M. As Tabelas 25 e 26 apresentam as análises da variância correspondentes às correlações das Tabelas 23 e 24.

SPALT(1958), e posteriormente WANGAARD e GRANADOS(1967), estudando a higroscopicidade da madeira no ponto de saturação das fibras, verificaram ter o valor de M, que significa a disponibilidade de locais para adsorção/dessorção, um efeito acentuado na adsorção monomolecular de umidade, mas que esse efeito na adsorção polimolecular era masca rado pela ação dos extrativos agindo como material de enchimento.

Tabela 23. Resultados da regressão linear aplicada às correlações entre o valor de M e as umidades adsorvidas na forma de hidrato (U_h) e na solução (U_s), estimadas para a unidade de saturação das fibras.

CORRELAÇÃO	EQUAÇÃO DA REGRESSÃO	r ²	t(B)
M x U _h	U _h = 8,55 - 0,0121(M)	0,9120	3,220 ^{ns}
M x U _s	U _s = 16,53 + 0,0039(M)	0,0081	0,091 ^{ns}

t(B) = teste t aplicado ao parâmetro B.

ns = não significativo

Tabela 24. Resultados da regressão linear aplicada às correlações entre a umidade de equilíbrio (UE) e as umidades adsorvidas na forma de hidrato (U_h) e na solução (U_s), estimadas para a unidade de saturação das fibras.

CORRELAÇÃO	EQUAÇÃO DA REGRESSÃO	r ²	t(B)
U _h x UE	UE = 23,66 - 0,3108(U _h)	0,0095	0,097 ^{ns}
U _s x UE	UE = 6,39 + 0,8889(U _s)	0,9161	3,300 ^{ns}

t(B) = teste t aplicado ao parâmetro B.

ns = não significativo.

Tabela 25. Análise da variância para as correlações apresentadas na Tabela 23.

Causa da variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F
<u>M x Uh (c.v.= 8,13%)</u>				
Regressão	1	1,3325	1,3325	10,37 ^{ns}
Resíduo	1	0,1285	0,1285	
Total	2	1,4610		
<u>M x Us (c.v.= 23,13%)</u>				
Regressão	1	0,1403	0,1403	0,008 ^{ns}
Resíduo	1	17,1075	17,1075	
Total	2	17,2478		

c.v. = coeficiente de variação.

ns = não significativo.

Tabela 26. Análise da variância para as correlações apresentadas na Tabela 24.

Causa da variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F
<u>UE x Uh (c.v.= 17,22%)</u>				
Regressão	1	0,1405	0,1405	0,0095 ^{ns}
Resíduo	1	14,7380	14,7380	
Total	2	14,8785		
<u>UE x Us (c.v.= 6,73%)</u>				
Regressão	1	13,6300	13,6300	10,92 ^{ns}
Resíduo	1	1,2485	1,2485	
Total	2	14,8785		

c.v. = coeficiente de variação.

ns = não significativo.

SPALT(1958), verificou também que a umidade de saturação das fibras é determinada quase que na sua totalidade pela adsorção polimolecular, não sofrendo influência da adsorção na forma de hidrato.

Apesar das correlações apresentadas nas Tabelas 23 e 24 não terem acusado significância (provavelmente devido ao reduzido número de graus de liberdade), nota-se que a correlação entre M e U_h apresenta valores de $t(B)$ e F notadamente superiores aos da correlação entre M e U_s . O mesmo acontece para a relação entre U_E e U_s quando comparada à relação entre U_E e U_h .

Esse fato, respaldado nos trabalhos desenvolvidos por SPALT(1958), e WANGAARD e GRANADOS(1967), permite aceitar a possibilidade da adsorção de umidade na forma de hidrato ter sido afetada pela disponibilidade de locais para adsorção/dessorção, e também da umidade de saturação das fibras ter sido determinada principalmente pela adsorção polimolecular de umidade.

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e na discussão dos mesmos pode-se concluir que :

a. um acréscimo no teor de extrativos provocou um decréscimo na umidade de equilíbrio, independentemente da espécie e de variações na temperatura e na umidade relativa;

b. o efeito depressivo dos extrativos na umidade de equilíbrio, para as três espécies estudadas, acentua-se a medida em que aumento a umidade relativa, porem não se altera com mudanças de temperatura;

c. a redução na higroscopicidade para o pinho está mais relacionada com os extrativos soluveis em álcool-benzeno do que com os soluveis em água. Para o mogno ocorre o inverso, com o efeito dos extrativos soluveis em água apresentando uma correlação ligeiramente maior. O eucalipto citriodora não mostrou diferenças entre a influência dos dois tipos de componentes estranhos;

d. em termos quantitativos, tanto os extrativos soluveis em água como os soluveis em álcool-benzeno têm o mesmo efeito na redução da umidade de equilíbrio;

e. a redução da higroscopicidade é acentuada para o eucalipto citriodora, decrescendo gradativamente para o pinho e o mogno;

f. o efeito da densidade básica na umidade de equilíbrio é um reflexo de sua correlação com o teor de extrativos;

g. o teor de extrativos não é fator dominante nas relações água-madeira e sua forma de atuação varia com a espécie, principalmente para condições de umidade relativa inferiores a 90%;

h. a atuação dos extrativos como material de enchimento reduz a adsorção monomolecular e polimolecular de umidade. Esse efeito é observado em sua plenitude na umidade de saturação das fibras, quando espécies com maior teor de extrativos apresentam umidades de equilíbrio inferiores.

O estudo desenvolvido permite ainda prever que:

a. as umidades de equilíbrio calculadas com base nas tabelas do Forest Products Laboratory ou na equação de Simpson não são adequadas para as madeiras de mogno e eucalipto citriodora;

b. na umidade de saturação das fibras a disponibilidade de locais para adsorção/dessorção, representada pelo parâmetro M da teoria de Hailwood e Horrobin, afetou apenas a adsorção monomolecular de umidade;

c. a umidade de saturação das fibras foi determinada principalmente pela adsorção polimolecular de umidade;

d. um aumento no teor de extrativos provocou um acréscimo na densidade básica das folhosas;

e. sugerem-se pesquisas para estudar as relações água-madeira das espécies mais utilizadas em marcenaria e construção civil, visando a elaboração de tabelas que auxiliem a secagem racional dessa madeira.

7. SUMMARY

The objectives of this study were to determine the influences of specific gravity and extractives content on the equilibrium moisture content for Parana-pine (Araucaria angustifolia (Bert.) O.Ktze.), mahogany (Swietenia macrophylla King) and eucalipt (Eucalyptus citriodora Hook) woods.

Water-soluble and alcohol-benzene-soluble extractives content, specific gravity and the equilibrium moisture content at temperatures of 40°C, 50°C and 60°C, and relative humidity of 40%, 60% and 79% were determined for samples of the three species. The data were analysed through linear regression and water sorption theory of Hailwood and Horrobin.

The most important conclusions are summarized as follows:

1. for all three species tested when the extractives content increases the equilibrium moisture content decreases.
2. the extractive effect increases with the relative humidity increase, but it remains constant with

temperature change.

3. the equilibrium moisture content reduction caused by the water-soluble extractives is quantitatively the same caused by the alcohol-benzene-soluble extractives.

4. the specific gravity did not affect the equilibrium moisture content for the species studied. The specific gravity influence was simply a reflection of its correlation with extractive content.

5. the bulking effect of the extractives reduced the monomolecular and the polymolecular adsorption.

8. LITERATURA CITADA

ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, São Paulo, 1974. Normas Técnicas.

BROWNING, B.L., 1967. Methods of Wood Chemistry. New York, John Wiley and Sons, 384p.

BUCHANAN, M.A., 1963. Extraneous Components of Wood. In: Browning, B.L., Ed. The Chemistry of Wood. New York, John Wiley and Sons, p.313-68.

CHOONG, E.T., 1969. Effect of Extractives on Shrinkage and Other Hygroscopic Properties of Ten Southern Pines. Wood and Fiber, Madison, 1:124-33.

DEMARRE, L.A. e R.W.ERICKSON, 1976. Temperature Dependent Effect of Extractive Content on Redwood Shrinkage. Wood Science, Madison, 8: 227-33.

FOELKEL, C.E.B. e M.A.M. BRASIL e L.E.G. BARRICHELO, 1971. Mé-
todos para a Determinação da Densidade Básica para Conife-
ras e folhosas. IPEF, 2/3: 65-74.

FOELKEL, C.E.B. e L.E.G. BARRICHELO e A.F. MILANEZ, 1975. Estu-
do Comparativo de Madeiras de Eucalyptus saligna, E. pani-
culata, E. citriodora, E. maculata e E. teriticornis para
Produção de Celulose Sulfato. IPEF, Piracicaba, 10: 17-37.

FOREST PRODUCTS LABORATORY, Washington, 1955. Wood Handbook.
528p.

GALVÃO, A.P.M., 1975. Estimativas da Umidade de Equilíbrio da
Madeira em Diferentes Cidades do Brasil. IPEF. Piracicaba,
11: 53-70.

HIGGINS, H.G. et alii, 1973. The density and Structure of
Hardwoods in Relation to Paper Surface Characteristics and
Other Properties. TAPPI, Atlanta. 56: 127-31.

HOFFMANN, R. e S. VIEIRA, 1977. Análise de Regressão: Uma In-
trodução à Econometria. São Paulo, Editora Hucitec, EDUSP.
340p.

KOLLMANN, F.F.P. e W.A. CÔTÊ JR., 1968. Principles of Wood
Science and Technology. New York, Springer-Verlag. v.1.

- MC MILLIN, C.W., 1968. Chemical Composition of Loblolly Pine Wood as Related to Specific Gravity, Growth Rate, and Distance from Pith. Wood Science and Technology, Berlin, 2: 233-40.
- MEYER, R.W. e G.M. BARTON, 1971. A Relationship between Collapse and Extractives in Western Red Cedar. Forest Products Journal, Madison, 21: 58-60.
- NEARN, W.J., 1955. Effect of Water Soluble Extractives on the Volumetric Shrinkage and Equilibrium Moisture Content of Eleven Tropical and Domestic Woods. Pennsylvania State University, Pennsylvania, 37 p. (Bulletin nº 598).
- ORMAN, H.R., 1966. New Zeland Timbers and Atmospheric Moisture. New Zeland, New Zeland Forest Products Laboratory. 26 p.
- PECK, E.C., 1955. Moisture Content of Wood in Use. Wisconsin, Forest Products Laboratory. 12 p.
- PRATT, G.H., 1974. Timber Drying Manual. London, Departament of the Environment. 152 p.
- SIMPSON, W.T., 1971. Equilibrium Moisture Content Prediction for Wood. Forest Products Journal, Madison, 21: 48-9.
- SIMPSON, W.T., 1973. Predicting Equilibrium Moisture Content of Wood by Mathematical models. Wood and Fiber, Madison, 5: 40-9.

- SKAAR, C., 1972. Water in Wood. Syracuse, Syracuse University Press. 218 p.
- SMITH, D.M., 1965. Determination of Cell Diameter and Cell Wall Thickness by Analytical Methods. IUFRO - Division of Forest Products, Proceedings. Melbourne, CSIRO. v.2.
- SMITH, D.M. e R.B. MILLER, 1964. Methods of Measuring and Estimating Tracheids Wall Thickness of Redwood. TAPPI, Atlanta, 10: 599-604.
- SPALT, A.H., 1958. The Fundamentals of Water Sorption by Wood. Forest Products Journal. Madison, 8: 288-95.
- STAMM, A.J., 1964. Wood and Celulose Science. New York, Ronald Press. 269 p.
- STAMM, A.J. e W.K. LOUGHBOROUGH, 1935. Thermodynamics of the Swelling of Wood. Wiscosin, Forest Products Laboratory, 15 p.
- TARAS, M.A. e J.R. SAUCIER, 1967. Influence of Extractives on Specific Gravity of Southern Pine. Forest Products Journal. Madison, 17: 97-9.
- TAYLOR, F.W., 1974. Effect of Extraction on the Volume Dimensions and Specific Gravity of Solid Wood Blocks. Wood Science. Madison, 6: 396-404.

VERMAAS, H.F., 1975. Research Note on the Correlation Between the Density and Extractive Content of Wood. South African Forestry Journal. Johannesburg, 92: 24-6.

WANGAARD, F.F. e L.A. GRANADOS, 1967. The Effect of Extractives on Water Sorption by Wood. Wood Science and Technology. Berlin, 1: 253-77.

YAO, J., 1972. On Volumetric Shrinkage, Specific Gravity, and Fiber Saturation Point of Loblolly Pine Wood. Wood Science. Madison, 4: 171-7.