

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA DENSIDADE EM
PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E ELASTICI-
DADE DA MADEIRA

ENG^a RAQUEL GONÇALVES TANAAMI

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

São Carlos, Novembro/86

INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA DENSIDADE EM
PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E ELASTICI-
DADE À FLEXÃO DA MADEIRA

Eng^a Raquel Gonçalves Tanaami

Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr

"Louvarei ao Senhor durante
a minha vida; cantarei lou
vores ao meu Deus enquanto
eu viver". (Salmo 146:2).

Aos meus pais Antonio e Alaide
e ao meu esposo Samuel pelo
amor e incentivo
e à Priscila ...

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr, por ter sido não somente um orientador, mas acima de tudo o amigo sempre presente.

A todos os professores, colegas e funcionários do LaMEM, dos quais sempre recebi atenção e carinho e em especial à Silvana, pela datilografia, ao Fernando pelo auxílio nos ensaios, ao Jaime e Roberto pelos desenhos e à bibliotecária Nanci pelo auxílio na pesquisa bibliográfica.

À bolsista Júnia Coutinho Anacleto pelo auxílio na preparação e execução dos programas estatísticos.

À FAPESP, pelo apoio financeiro.

Aos amigos Álvaro e Iara, Marcos e Nice, Maria Gilda, Lídia e Maria de Lourdes que partilharam comigo de todas as lutas.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise do comportamento da madeira submetida à flexão estática em função de sua umidade e densidade, com o intuito de se chegar a relações matemáticas e diagramas que possam ser representativos de tal comportamento na prática. O estudo se iniciou por espécie e teve suas conclusões generalizadas, independentes da espécie.

Foi estudado também o comportamento da resistência característica à flexão com a variação da umidade, bem como uma avaliação inicial da variação do módulo de elasticidade com a umidade.

Foram ensaiados corpos de prova de $2 \times 2 \times 30$ cm³ das espécies: Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*), Eucalipto Tereticornis (*Eucalyptus tereticornis*), Pinus Elliottii (*Pinus elliottii*) e Cumarú (*Coumaruna alata*).

As conclusões obtidas poderão fornecer subsídios para propostas de revisão das normas brasileiras a respeito das madeiras e das estruturas de madeira.

ABSTRACT

An analysis of wood in bending affected by moisture and density is presented in order to get mathematical relations and diagrams to explain its behaviour in service. The study was introduced by species and after generalized.

The influence of moisture on the characteristic values of resistance in bending and modulus of elasticity was studied too.

The tests were conducted on 2x2x30 cm³ specimen of four species: Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*), Eucalipto Tereticornis (*Eucalyptus tereticornis*), Pinus Elliottii (*Pinus elliottii*) e Comaru (*Coumaruna alata*).

The conclusions are significant contributions to the revision of the brazilian standards in wood and wooden structures.

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	1
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3- INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA DENSIDADE NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO	42
4- VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À FLEXÃO COM A UMIDADE	123
5- AVALIAÇÃO INICIAL DA VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM FUNÇÃO DA UMIDADE	163
6- CONCLUSÕES E PROPOSTAS	199
7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA DENSIDADE EM PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E ELASTICIDADE A FLEXÃO DA MADEIRA

1- INTRODUÇÃO

1.1- Generalidades

Considerando as propriedades físicas, de resistência e de elasticidade, altamente favoráveis de muitas espécies de madeira nativas e de algumas espécies aqui aclimatadas, conhecida sua disponibilidade no país, tanto em florestas naturais como em regiões de florestamento e reflorestamento, observada a possibilidade de renovação em intervalos de tempo significativamente interessantes, tem-se desenvolvido no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, estudos a respeito das mais variadas aplicações do material, tanto arquitetônicas como estruturais.

Soluções para diferentes problemas práticos já foram alcançadas, utilizando-se racionalmente a madeira. Estruturas para a sustentação de coberturas de médio a grande porte como tesouras, pórticos maciços ou treliçados, arcos maciços ou treliçados; pontes com vigas principais de seções unicirculares e bicirculares; pontes com vigas principais treliçadas, armadas, protendidas; estruturas especiais para armazenamento de cereais a granel e de materiais pulverulentos; cimbramentos de madeira para edifícios, pontes e viadutos de concreto armado; torres de vigia florestal; foram estudados com abordagem teórica e significativa comprovação experimental. Além disto, diversas alternativas para aplicação da madeira e dos produtos derivados da madeira na construção da habitação de baixo custo têm sido pesquisadas no LaMEM, desde o enfoque tecnológico abrangendo aspectos da secagem, do tratamento preservativo contra o ataque de fungos e de insetos xilófagos, do tratamento retardante da ação do fogo, até considerações a respeito da industrialização de componentes da habitação, como as estruturas de cobertura e os painéis divisórios, entre outros.

A satisfação pelas conquistas mencionadas e pelas derivações decorrentes não impediram, entretanto, a análise da realidade das estruturas de madeira no cenário da tecnologia brasileira, ob-

servando-se nitidamente a necessidade da pesquisa mais intensa referente a problemas fundamentais, à vista da adaptação, de todo o acervo de informações no assunto aos mais recentes conceitos da segurança estrutural, com base numa abordagem semi-probabilística.

1.2- IMPORTÂNCIA DO ESTUDO

O conhecimento mais preciso de propriedades de resistência e de elasticidade à flexão da madeira, bem como sua variação com a umidade e a densidade do material permitirá a verificação mais exata do comportamento de elementos estruturais de madeira.

O estágio atingido por meio dos resultados do presente trabalho proporcionará condições para a perfeita avaliação da resistência à flexão da madeira e de sua variação em níveis abaixo do ponto de saturação das fibras até zero por cento de umidade, para ampla faixa de densidades, abrangendo por hipótese a maioria dos valores com possibilidade de ocorrência na prática. Assim, pode-se melhorar a previsão do desempenho de elementos estruturais ao longo da vida em serviço das estruturas, à vista da conhecida variação da umidade da madeira com o tempo e sua tendência a estabilizar-se no ponto de equilíbrio ao ar - 12% nas condições ambientais usuais.

Também pode ser citado o fato de num mesmo lote de madeira, ser-lhe inerente certa variação de densidade de suas peças, devida aos diferentes locais de procedência, à posição das peças ao longo do comprimento e do diâmetro das árvores, originando, obviamente variação no comportamento do material.

A referida variação também se constitui de fundamental importância no caso de se trabalhar com peças estruturais de madeira laminada colada, onde é necessário conduzir as peças até umidade de equilíbrio ao ar para possibilitar melhores condições para sua adesão. A secagem traz, geralmente, o aumento dos parâmetros de resistência e elasticidade do material e a redução da densidade. O seu melhor aproveitamento se torna possível com os conhecimentos gerados no presente trabalho.

Paralelamente se reconhece não ser suficiente conhecer a variação das propriedades de resistência e de elasticidade à flexão de peças individuais de madeira. A análise de amostras se faz necessária à vista da importância de se avaliar não apenas os valo

res médios de um lote do material. É preciso investigar as dispersões de resultados pois, trabalhando-se em termos de valores característicos, o desvio padrão determinará eventuais variações dos mencionados valores. Este estudo, apresentado nos capítulos quatro e cinco do trabalho, embora se constituindo em avaliações iniciais do problema, já denota alguns fatos não de todo previsíveis intuitivamente e cujas consequências na prática não se pode, neste momento, avaliar em toda a sua extensão.

Enfim, de modo mais genérico e abrangente, os resultados alcançados no transcorrer do trabalho se constituirão, certamente, em oportunos subsídios para a revisão, ora em andamento, do texto da Norma Brasileira para o Cálculo e a Execução de Estruturas de Madeira (NBR 7190) e do Método Brasileiro para Ensaio Físicos e Mecânicos de Madeiras (NBR 6230).

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste trabalho, a revisão bibliográfica foi realizada com dupla finalidade. Inicialmente, pretendeu-se apresentar algumas considerações a respeito das características inerentes da madeira, de modo a possibilitar a adequada compreensão de aspectos fundamentais do comportamento do material. Em seguida, abrangendo idéias mais especificamente ligadas ao tema da dissertação, são mencionadas e convenientemente resumidas as principais publicações consultadas no decorrer da pesquisa.

Foram incluídas nessa lista de publicações textos clássicos a respeito das propriedades da madeira, artigos, notas e comunicações técnicas, dissertações de mestrado e teses de doutoramento publicados no país e no exterior.

2.1- ALGUMAS CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA

WILSON (26), em 1932, afirma que em função da espécie e do ambiente onde vive a árvore, por ocasião do seu corte a porcentagem de umidade pode variar significativamente. Algumas atingem mais de 100% e outras dificilmente ultrapassam 50%. O autor apresenta diversas considerações a respeito da secagem resumidas a seguir.

Depois de uma amostra de madeira ficar exposta por algum tempo às condições naturais da atmosfera, o teor de umidade da superfície atinge o equilíbrio com a temperatura ambiente e a umidade do ar. Ligeiras flutuações em torno deste equilíbrio ocorrem em função de mudanças nestes fatores naturais. As porcentagens de umidade de equilíbrio variam de 5%-8% em climas secos e frios a 18%-20% em climas úmidos e quentes. O interior da madeira continua secando através da transferência de umidade para a superfície (onde se dá a evaporação) até o centro atingir a umidade onde cessa a secagem natural. A porcentagem de umidade de equilíbrio pode ser baixada através da secagem artificial em estufa. Na figura 2.1 está mostrada a relação entre a umidade de equilíbrio com a temperatura e a umidade relativa do ar para a espécie Sitka Spruce.

A respeito do ponto de saturação, o autor define teoricamente como o estado no qual as paredes das células estão completa-

mente saturadas e as cavidades das fibras totalmente sem água. Todavia, este estado é raramente atingido, exceto por fibras isoladas, ou por pequenos fragmentos de madeira. A partir do ponto de saturação se inicia a retração devida ao secamento das fibras da madeira e suas propriedades começam a ser afetadas.

Presumivelmente, se a umidade tornar-se uniforme na amostra de madeira durante a secagem, esta como um todo apresentará variação em suas características apenas quando o ponto de saturação for alcançado e não antes.

Como a uniformidade de distribuição de umidade é inatingível em amostras de dimensões estruturais e, na prática, a superfície das peças atinge o ponto de saturação antes do interior, assim há possibilidade de serem observadas mudanças nas propriedades da amostra antes da porcentagem média de umidade atingir o valor equivalente ao ponto de saturação.

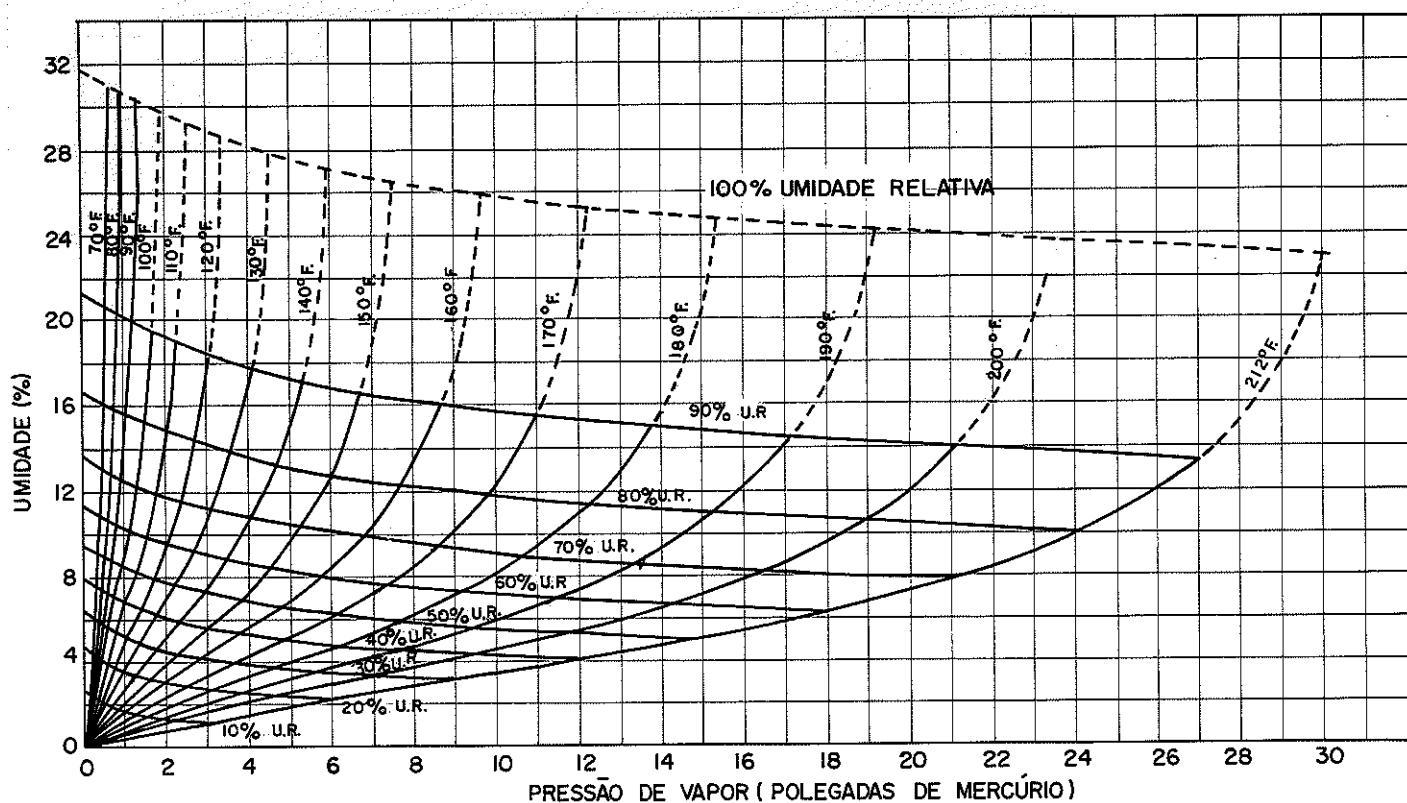


Fig.21- Relação entre a umidade de equilíbrio da Sitka Spruce e os valores indicadores de temperatura, umidade relativa e pressão de vapor.

YOUNGS e JAMES, em 1965 (28), descreveram a madeira como um material de estrutura interna até certo ponto complexa, envolvendo uma série de elementos anatômicos, diferenciados em suas funções e orientados predominantemente na direção paralela ao eixo longitudinal da árvore (direção axial).

Através do uso de raio X e de técnicas de microscopia eletrônica, concluíram que as células componentes das paredes dos elementos da estrutura principal se distribuem em camadas, cada uma delas com fibrilas orientadas conforme está mostrado na figura 2.2. Além disto, definiram duas condições das moléculas de água presentes no interior da madeira. A "água livre" está contida nas cavidades dos elementos anatômicos e nelas pode se movimentar sob a pressão de forças capilares. A "água de impregnação" se situa nas paredes dos elementos anatômicos, ligados através de pontes de hidrogênio, seis moléculas para cada unidade básica de celulose.

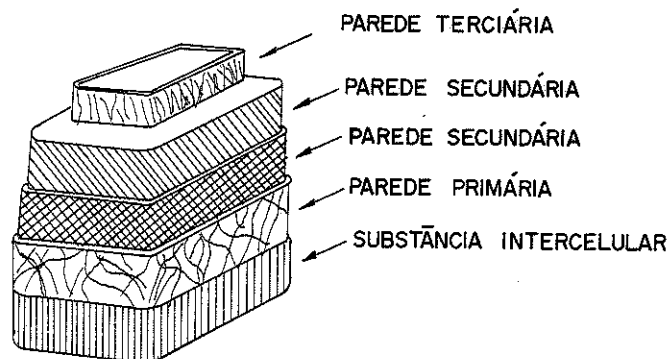


Fig.2.2- Representação esquemática da orientação microfibrilar nos diversos níveis da parede celular de um traqueíde (conífera).

Cortada a árvore as paredes das células estão saturadas com água de impregnação (condição "inchada"). Há também quantidade apreciável de água livre nas cavidades das células. Na secagem da madeira remove-se toda água livre e grande parte da água de impregnação. Neste processo ocorrem ao mesmo tempo a evaporação da água e o movimento da umidade do interior para a superfície.

O movimento interno da umidade é realizado inicialmente por capilaridade, mas numa maior extensão também por uma combinação de difusão de vapor e água de impregnação.

Tal movimento ocorre transversalmente na madeira em res -

posta ao gradiente de pressão de vapor. Cada célula participa da secagem: primeiramente a água livre é retirada e, depois, a água de impregnação, devido à diferença das forças atuantes em cada uma delas.

Deste modo, as células atingem diferentes níveis de umidade: por volta de 30%, cada cavidade celular não mais contém água livre e as paredes, devido ao movimento interno da umidade, estão saturados de água de impregnação. Este estágio é conhecido como "ponto de saturação das fibras". A partir deste ponto a redução de umidade se dá mais lentamente afetando as características de resistência e elasticidade da madeira.

Os autores mostram também a relação entre absorção e perda de água com a pressão de vapor, bem como a relação entre a umidade na madeira e umidade relativa do ar, figuras 2.3 e 2.4.

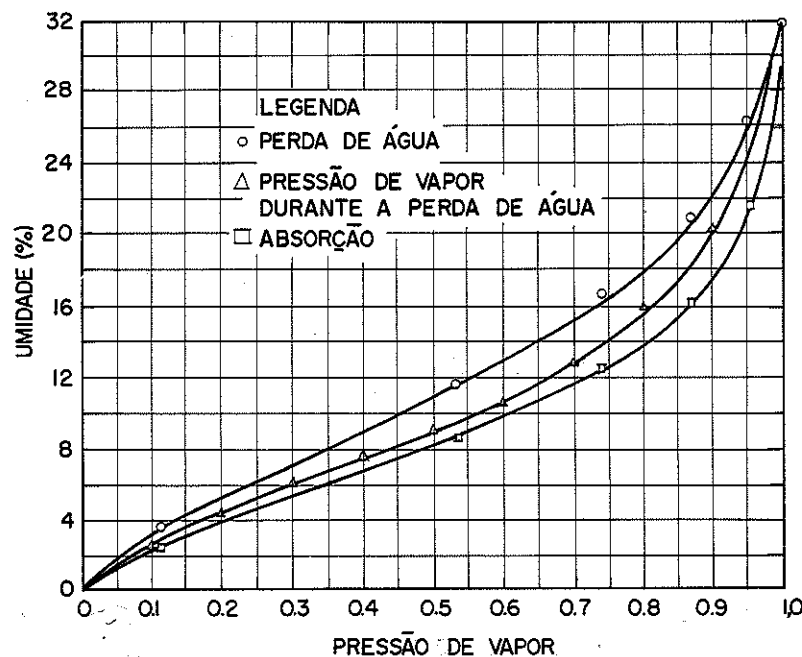


Fig.2.3- Relação entre pressão de vapor e umidade

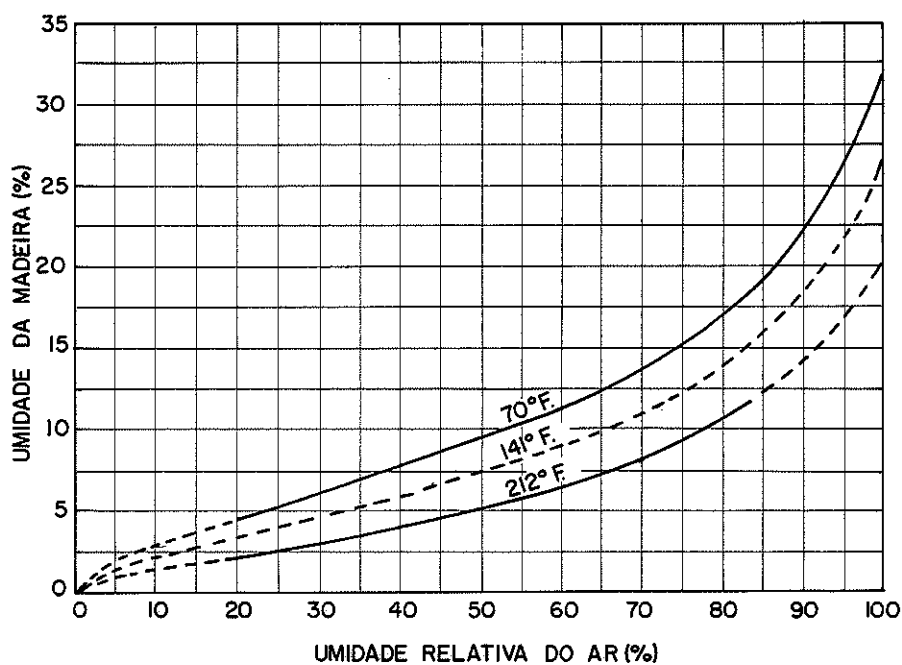


Fig.2.4- Relação entre a umidade de equilíbrio da madeira e a umidade relativa do ar em 3 temperaturas.

HELLMEISTER, em publicações de 1982 (11), afirma que para se entender e explicar as características físicas e mecânicas da madeira são necessárias noções claras a respeito de sua natureza; seu comportamento nas diversas solicitações mecânicas tem causas e limitações na própria constituição do material. Para um melhor entendimento desta constituição são aqui relatados aspectos apresentados pelo autor em sua publicação:

. Natureza da Madeira - Constituição Molecular

Por ser um material complexo, não se pode, a rigor, examinar a constituição molecular da madeira, mas sim das substâncias que a formam.

Grande parte de suas características físicas, de resistência e de elasticidade se devem à estrutura molecular da celulose e lignina, as quais representam cerca de 90% das substâncias componentes da madeira, sendo a celulose responsável por 60 a 70%. As unidades básicas de celulose se reúnem em cadeias lineares, sem ramificações, com elevado grau de polimerização.

As cadeias de celulose agrupam-se através de ligações la-

terais por pontes de hidrogênio.

Interligando a celulose e preenchendo vazios encontra-se a lignina.

As referidas características de madeira são, fundamentalmente, o resultado da associação da celulose e da lignina.

. Ultra Estrutura

A ultra estrutura da madeira engloba os elementos visíveis apenas com o auxílio da microscopia eletrônica.

São elementos anatômicos formando as diversas camadas de crescimento tendo diferentes porcentagens de celulose e lignina. Basicamente três camadas se formam com o decorrer do tempo, sendo interligadas pela lignina, composto orgânico ao qual pode-se atribuir a rigidez e a dureza da madeira. Maior porcentagem de lignina representa diminuição de absorção de água. Pode-se dizer que a lignina na madeira faz o trabalho do cimento no concreto.

. Estrutura Microscópica

No tronco da árvore, entre a madeira e a casca, há uma camada microscópica de tecido meristemático (divisível), o câmbio. As células do câmbio reproduzem, algumas mantêm o seu caráter meristemático, outras se modificam formando tecidos permanentes, dos quais alguns regeneram a casca e outros formam a madeira.

Neste ponto começa a se manifestar a diversificação das espécies; as células produzidas pelo câmbio para formar a madeira seguem dois esquemas distintos de especialização: coníferas e dicotiledôneas.

As coníferas, vulgarmente chamadas "madeira mole", apresentam ao microscópio dois elementos essenciais: tranqueídes e raios fusiformes. Os tranqueídes são células alongadas, com 3 a 5 mm de comprimento, 40 a 60 μ de diâmetro, seção transversal vazada de forma quadrada a sextavada com extremidades biseladas fechadas. Tranqueídes vizinhos se comunicam geralmente pelas extremidades, através de válvulas típicas denominadas pontuações areoladas; os tranqueídes constituem até mais de 90% da madeira das coníferas.

Os raios fusiformes são conjuntos de células alongadas e achatadas que se dispõem radialmente em forma de fitas, da casca até

o centro da árvore. As células dos raios se comunicam com os traqueídes através de perfurações nas suas paredes designadas pelo seu aspecto como pontuações simples. Os raios constituem até 10% da madeira das coníferas. Das 520 espécies de coníferas existentes, cerca de 30 têm importância comercial.

As dicotiledôneas são mais evoluídas do que as coníferas e sua madeira é vulgarmente designada "dura". Apresenta ao microscópio três elementos essenciais: vasos, fibras e raios heterocelulares. Os vasos vistos em seção transversal são chamados poros e são células alongadas, com 0,2 a 2 mm de comprimento, 20 a 300 μ de diâmetro, seção transversal vasada e arredondada. Os vasos alinham-se mais do que os traqueídes e a comunicação entre as células é direta desaparecendo total ou parcialmente as extremidades celulares. Os vasos constituem de 20 até 50% da estrutura da madeira das dicotiledôneas.

As fibras são células longas, com 0,7 a 1,4 mm de comprimento, de seção transversal vasada e arredondada, paredes espessas fechadas e afinando nas extremidades. Pode ocorrer ligações entre fibras: pontuações areoladas (fibra-traqueíde) ou simples (fibra libriforme). As fibras podem constituir de 25 até 50% da estrutura da madeira, dependendo da espécie.

Raios heterocelulares são conjuntos de células dispostos na madeira do câmbio até o centro, têm estrutura mais complexa e variada que os raios da conífera; ligam-se aos vasos e às fibras através de pontuações simples e areoladas. Os raios cujas células não forem diversificadas são designados como homocelulares.

. Estrutura Macroscópica

A árvore apresenta uma primeira fase de crescimento vertical ou axial. A seguir, ano após ano, formam-se camadas sucessivas de tecido resistente e condutor, pois o tronco suporta a copa e, pelas suas camadas periféricas, sobe das raízes às folhas a seiva bruta.

Pela necessidade de resistir a esforços axiais de tração e compressão e para conduzir a seiva bruta, os elementos anatómicos convencionalmente designados como fibras, arranjam-se durante a sua formação segundo a direção do eixo do tronco ou galhos, dispostos em camadas concêntricas de crescimento axial e são responsáveis pela resistência do tronco. Este, conseqüentemente, apresenta

ta uma camada central de características especiais, geralmente inferiores às da madeira propriamente ditas: a medula.

As camadas externas, mais novas, vivas, condutoras da seiva designadas por alburno são geralmente menos resistentes mecanicamente, menos densas e contêm mais água.

As camadas mais antigas designadas por cerne tendem a armazenar resinas, gomas, óleos, taninos e corantes, tornando-se mais resistentes. A figura 2.5 mostra esquematicamente estas diferenças.

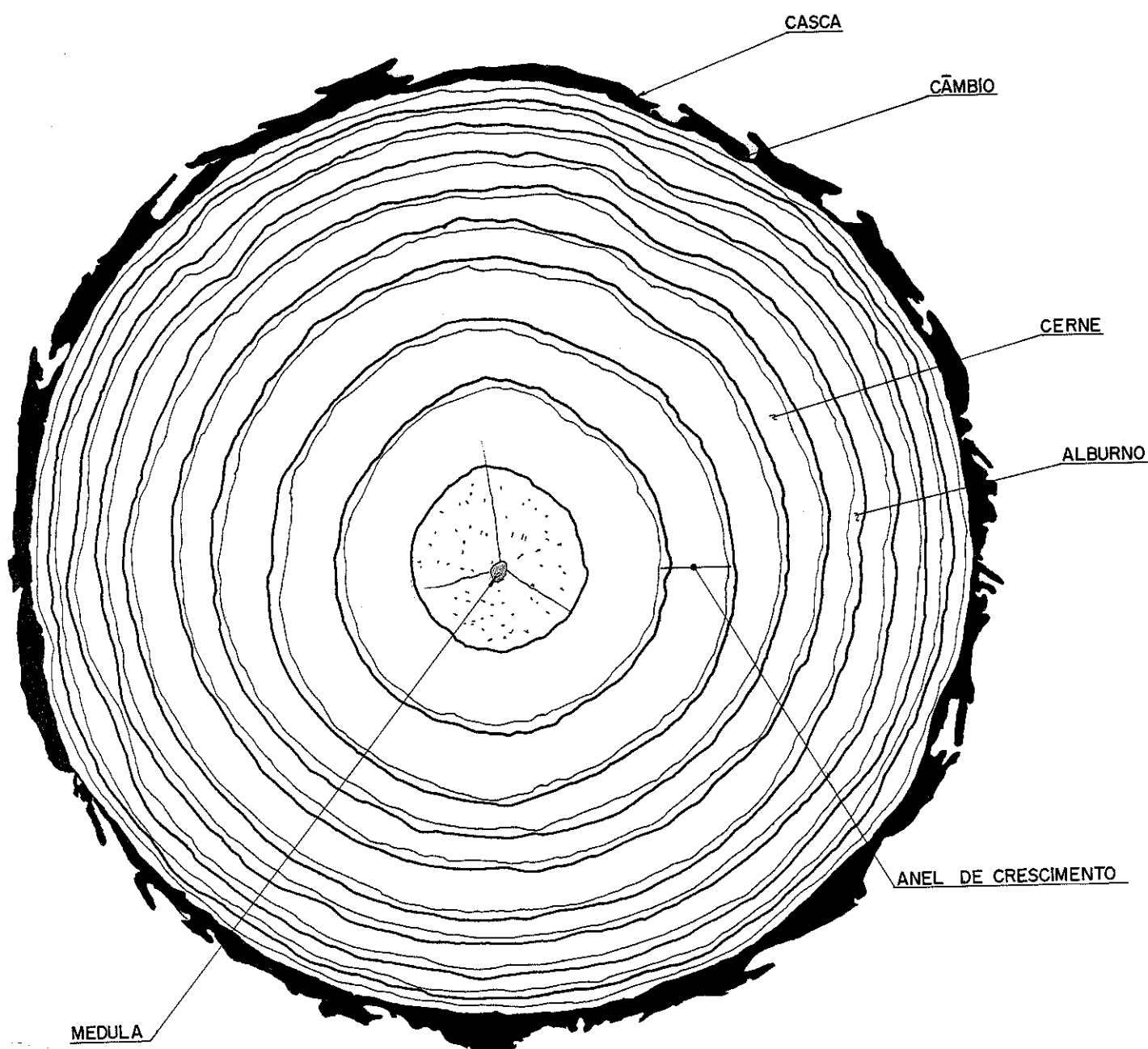


Fig.2.5- Corte transversal de um tronco de árvore

. Relação Água-Madeira

Quanto à umidade na madeira, Hellmeister faz comentários a respeito da água livre e da água de impregnação dizendo que, enquanto a árvore está viva, encontra-se a seiva bruta subindo pelo alburno e a seiva elaborada descendo pelo câmbio. A seiva elaborada penetra radialmente na madeira pelos raios. Em relação as propriedades físicas da madeira, a seiva contida nos vazios dos elementos anatômicos é considerada água livre, isto é, pode circular livremente sem afetar a forma e as dimensões da madeira.

A evaporação muito rápida da água livre pode provocar tensões capilares elevadas, geralmente causadoras de defeitos de secagem, quando esta é artificial e mal conduzida. Apresenta o conceito de água de impregnação como sendo ligada às moléculas de celulose, hemicelulose e lignina através de suas oxidrilas.

A umidade da madeira costuma ser determinada evaporando-se toda a água da madeira em estufa, a $100 \pm 3^\circ\text{C}$ até atingir massa constante. Seu cálculo é feito pela expressão:

$$U = \frac{M_u - M_o}{M_o} \times 100$$

onde: U = umidade procurada

M_u = massa da madeira cuja umidade se procura

M_o = massa da madeira seca em estufa

A madeira recentemente derrubada costuma ter sua umidade variando de 40 a 140% conforme a espécie. Nestas condições é designada de "madeira verde". A respeito da secagem da madeira, o autor explica que logo após o corte e o desdobro, a água da madeira começa a evaporar, pois o ar é geralmente ávido de umidade. A água livre evapora-se com facilidade, até o ponto de saturação. Este ponto pode variar entre 25 e 30%, dependendo da espécie, e é definido como a umidade limite, acima da qual existe água livre e abaixo da qual apenas água de impregnação. A partir do ponto de saturação, o processo de evaporação da água continua, porém mais lentamente, até atingir a umidade de equilíbrio com as condições do ambiente. Estas são instáveis e a umidade da madeira ao ar oscila em torno do valor de 12%, sendo considerada, nestas condições, como "seca ao ar".

A evaporação da água de impregnação exige um fornecimento de calor para aquecer a madeira e romper as ligações de hidrogênio.

Atenta o autor para um modo de se reduzir mais rapidamente a umidade da madeira até atingir a porcentagem de equilíbrio ao ar, ou mesmo níveis mais baixos: o uso de estufas.

Estudo criterioso nesta direção conduziu a um programa de secagem, resumido na tabela abaixo:

Umidade desejada (%)	Temperatura da estufa °C	Tempo
12	25	3 dias
9	35	3 dias
6	45	3 dias
3	60	3 dias
0	100	3 dias

. Densidade da Madeira

Hellmeister qualifica a densidade como uma das propriedades mais significativas para caracterizar madeiras destinadas à construção civil.

O conceito físico indispensável à compreensão do assunto é apenas o da quantidade de massa contida na unidade de volume.

A densidade aparente ou simplesmente densidade da madeira é determinada dividindo-se a massa, na umidade do corpo de prova, pelo volume, obtido a partir de medidas com o paquímetro ou palmer (DIN 52.182), por deslocamento de água (ASTM 143) ou por deslocamento de mercúrio (IPT, NBR 6230).

Estudos experimentais realizados pelo autor demonstraram ser o método da medida do corpo de prova com paquímetro o mais prático, apresentando resultados menos discutíveis.

O conceito de densidade real, geralmente é usado não como parte da rotina experimental para caracterização da madeira, mas sim para esclarecer a natureza e comportamento da mesma.

Para determinar a densidade real da madeira preenchem-se todos os vazios do corpo de prova com algum fluido obtendo-se, por diferença com o volume total, o volume real da madeira. Dividindo-se a massa da madeira completamente seca, isto é, com 0% de umidade, pelo seu volume real, obtem-se a densidade real.

Além disto, Hellmeister explica que, devido à variação da massa e do volume da madeira com a umidade, diversas instituições consagradas internacionalmente têm adotado uma forma especial para calcular a densidade da madeira, considerando a massa real, isto é, da madeira completamente seca e o volume verde. A densidade básica é um valor aceito por sua natureza: a massa da madeira totalmente seca e o volume da madeira verde são considerados invariáveis. Entretanto, os dois valores são obtidos em condições diversas: o volume da madeira com umidade elevada e a massa da madeira totalmente seca, tornando-se assim um valor convencional.

Finalmente com respeito à relação umidade-densidade apresenta o diagrama de Kollmann, figura 2.6, adotado pela norma DIN para ajustar valores umidade-densidade. Isto é, tendo-se a densidade de uma amostra de madeira a um nível qualquer de umidade, pode-se obter sua densidade em outros teores.

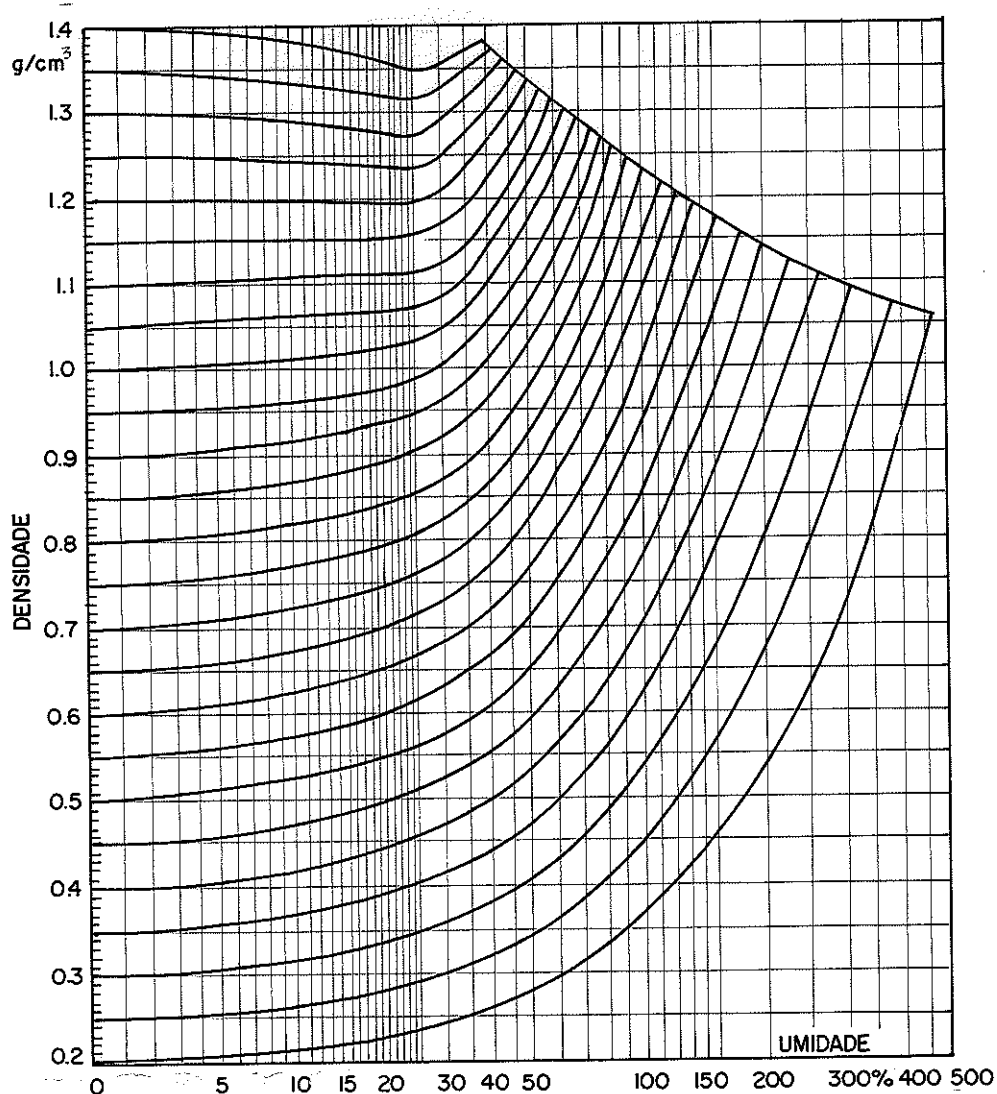


Fig.2.6- Diagrama de Kollmann relacionando umidade e densidade da madeira.

Com o objetivo de examinar a validade do citado diagrama para madeiras nacionais, o autor comparou resultados experimentais com resultado do diagrama, chegando à conclusão de que, apesar de haver uma diferença da ordem de $\pm 1\%$, os valores do diagrama podem ser utilizados na prática.

PIGOZZO, em 1982 (22), apresenta algumas considerações sobre as variações de densidade mostrando a existência de uma relação intrínseca entre a densidade e várias propriedades de resistência mecânica das madeiras. Há uma relação quase linear entre a máxima resistência à compressão, dureza e densidade.

Relata que, conforme FINDLAY, o coeficiente de correlação entre densidade e máxima resistência à compressão é 0,815 para a média de várias espécies, figura 2.7. Tal valor representa alta correlação.

Pigozzo também verificou haver um aumento de resistência com redução da umidade. Uma peça de madeira na umidade de equilíbrio ao ar pode ser até duas vezes mais resistente em relação à mesma peça na condição verde. Esta relação pode variar com a espécie, com a distribuição da umidade na seção transversal e com a propriedade mecânica considerada.

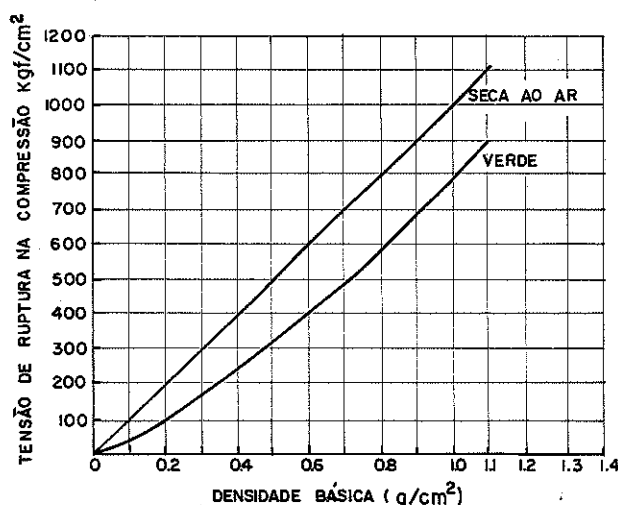


Fig.2.7-

2.2- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS LIGADAS AO TEMA DA DISSERTAÇÃO.

WILSON, em 1932 (26), apresenta citações a respeito do primeiro estudo sistemático realizado no Forest Products Laboratory, relacionando a umidade da madeira e algumas de suas proprieda-

des de resistência. São citações de uma série de testes conduzidos por H.D. Tiemann em 1903 e 1904.

Nesta época, pesquisadores europeus já haviam ensaiado a madeira climatizada em diferentes níveis de umidade e demonstrado o acréscimo da resistência com a redução da umidade. Entretanto, ainda não era reconhecida a existência do ponto de saturação, cujo conceito foi citado, pela primeira vez, no Boletim 70, do Forest Products Service.

Wilson apresenta, neste trabalho, curvas relacionando a umidade e a resistência, obtidas a partir dos resultados dos ensaios realizados pelos pesquisadores europeus, figura 2.8.

Além disso, Wilson afirma que se a umidade não é uniformemente distribuída na amostra de madeira, a periferia pode estar abaixo do ponto de saturação enquanto a parte interna pode conter água livre.

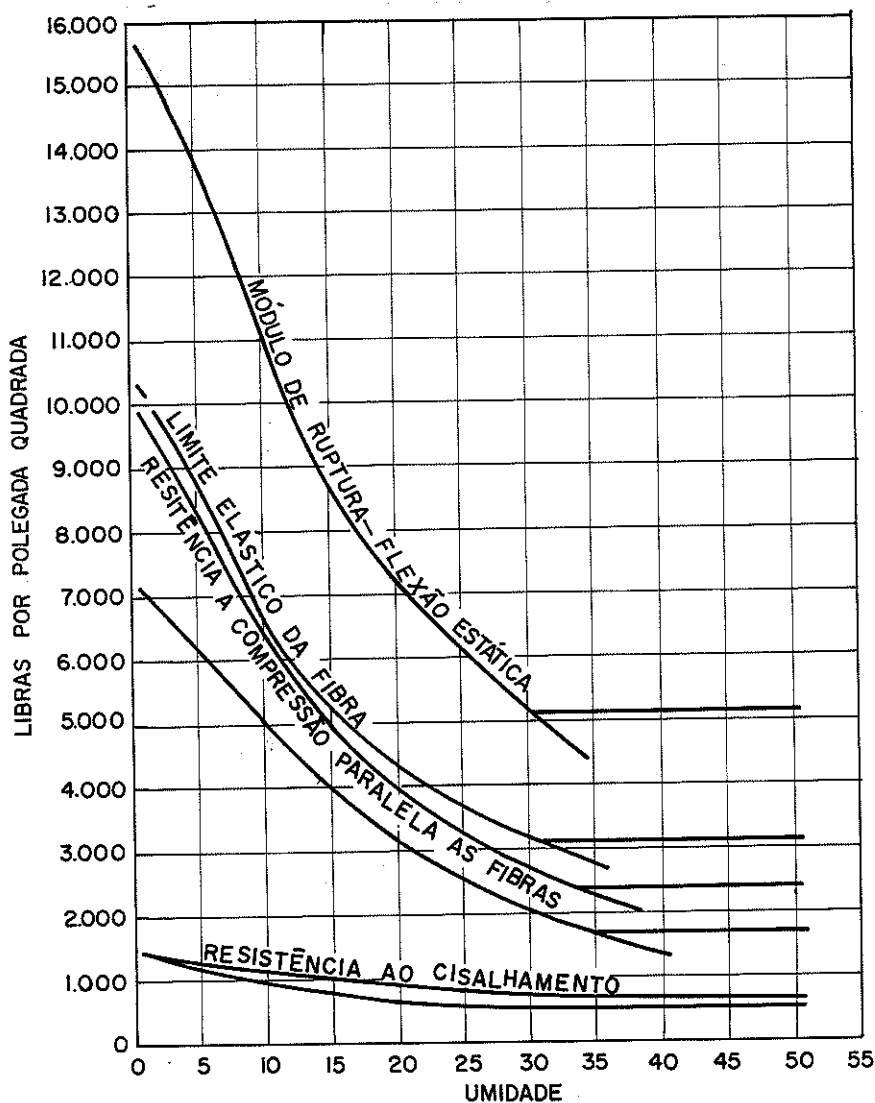


Fig.2.8- Curvas características das propriedades de resistência umidade para Red Spruce.

Na figura 2.9 são apresentadas duas curvas relacionando a umidade e resistência da madeira: uma obtida a partir de resultados de ensaios de corpos de prova climatizados, isto é, com umidade uniforme ao longo de sua seção transversal, e outra a partir de resultados de ensaios de corpos de prova não climatizados, isto é, com variação de umidade na seção transversal.

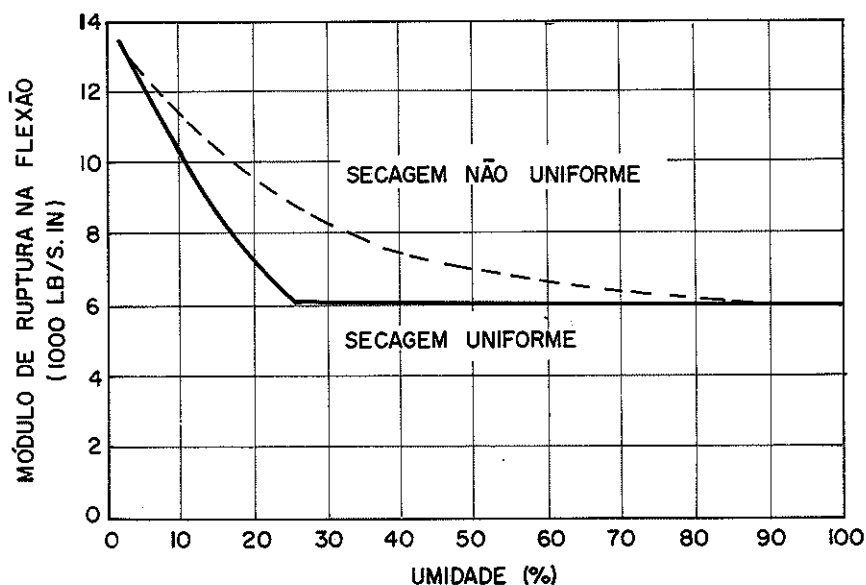


Fig.2.9- Relação entre módulo de ruptura na flexão e umidade para chestnut.

Os resultados de muitos ensaios foram sumarizados em uma série de tabelas apresentando fatores através dos quais o valor da resistência a uma porcentagem de umidade pode ser multiplicado para se obter o valor da resistência em outras porcentagens. Tais fatores estabelecidos a partir de curvas experimentais relacionam umidade e respectiva propriedade de resistência.

Explica o autor que a possibilidade de representação da relação entre a resistência e a umidade através de expressões matemáticas não foi investigada na oportunidade e que estudos posteriores conduziram a dois tipos de expressões: uma linear e outra exponencial. A primeira foi obtida da análise de várias curvas umidade resistência cujo exemplo é mostrado na figura 2.10. Pode ser visto que entre 6 e 12% de umidade há um grande desvio da reta.

Nos demais níveis de umidade foram feitos ajustes da curva com os pontos obtidos experimentalmente, conforme as indicações contidas no gráfico da mencionada figura.

Sendo:

S = valor da resistência a M% de umidade (psi)

G = valor da resistência na condição verde

S_{12} = valor da resistência ajustado para 12% de umidade

$$S_{12} = \frac{6(S-G)}{18-M} + G \dots\dots\dots (2.1)$$

para determinar S_{12} a partir de valores de resistência com umidades inferiores a 12%;

$$S_{12} = \frac{10(S-G)}{22-M} + G \dots\dots\dots (2.2)$$

para determinar S_{12} a partir de valores de resistência com umidade superiores a 12%.

Segundo o autor, o ajuste exponencial foi pesquisado pois a fórmula linear se constituia numa aproximação grosseira. Se fossem disponíveis resultados apenas para um número reduzido de umidades, grandes erros seriam possíveis. Assim, foi necessário um ajustamento mais acurado. Essa análise objetivou encontrar uma equação para relacionar a umidade e a resistência para muitas espécies de madeira. Dentro de certos limites, a relação entre o logaritmo do valor da resistência e a porcentagem de umidade pode ser representada, com bons resultados, por uma reta. Na figura 2.11 são reproduzidas as curvas da figura 10 bem como duas outras adicionais, com o valor de resistência plotado em escala logarítmica nas ordenadas e a porcentagem de umidade plotado nas abcissas.

A expressão estabelecida foi:

$$\log S = \log S_0 - K \dots\dots\dots (2.3)$$

equivalente a:

$$S = S_0 \cdot 10^{-k} \dots\dots\dots (2.4)$$

onde:

S e M = resistência e umidade dentro do intervalo de aplicabilidade da expressão.

S_0 = valor da resistência da madeira seca (umidade zero), se a equação for válida neste ponto.

K = constante obtida experimentalmente.

Diante do exposto, Wilson conclui que o ajuste entre a expressão exponencial e os resultados experimentais é muito bom em

um grande número de casos, sugerindo a possibilidade de esta se constituir em uma aproximação final da lei fundamental relacionando a umidade e as propriedades de resistência; os desvios entre os valores experimentais e os obtidos pela expressão podem surgir em função dos seguintes fatores: distribuição não uniforme de umidade na amostra; influência de "distúrbios causados pela infiltração de substância estranhas em algumas espécies", e, particularmente, a variedade de madeiras existentes.

Wilson apresenta ainda outras expressões para relacionar a umidade e a resistência da madeira:

$$S_p = S_0 \cdot 10^{-k_p} \dots\dots\dots (2.5)$$

onde:

- M_p = porcentagem de umidade no ponto de saturação
- S_p = valor da resistência neste ponto (resistência da madeira verde)
- K_p = constante obtida experimentalmente

Dividindo-se a equação (2.5) pela (2.4) tem-se:

$$\frac{S}{S_p} = 10^{k(M_p - M)} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\log S = \log S_p + k(M_p - M) \dots\dots\dots (2.7)$$

As equações (2.3) e (2.4) mostram que se o logaritmo dos valores de S determinados experimentalmente ou se a razão $\frac{S}{S_p}$ são plotados nos correspondentes valores de M, conforme pontos resultantes do gráfico linear, poderia se medir o ajuste do teste experimental com a expressão exponencial.

Da mesma forma, se a linha horizontal representa a resistência da madeira verde e a inclinada, passando pela média dos pontos, representa a resistência do material em baixos valores de umidade, a intersecção destas linhas resultará na determinação de M_p, numericamente igual à declividade, mas de sinal oposto. Portanto, K é positivo e a declividade é negativa para propriedade cujos valores aumentam com o decréscimo de umidade.

Ainda neste trabalho de Wilson, há referência à realização de estudos experimentais feitos no Forest Products Laboratory utilizando Stika Spruce, Douglas Fir, White Ash e Yellow Birch, com o intuito de comprovar a validade da representação exponencial para a relação resistência-umidade destas espécies, não estudadas an

teriormente.

Ao final é apresentada discussão dos resultados, cujo sumário é representado graficamente na figura 2.12.

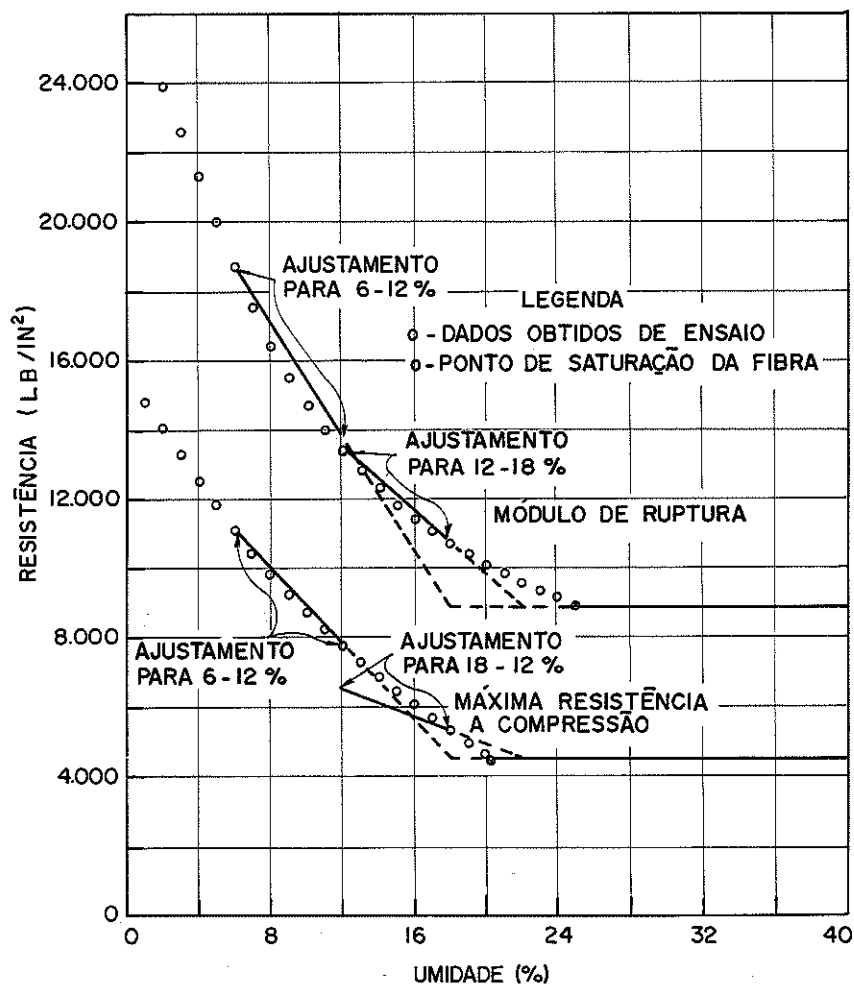


Fig.2.10- Relação entre módulos de ruptura e máxima tensão de compressão paralela às fibras para a espécie Longliaf Pine nas várias umidades. Ilustrações da fórmula linear.

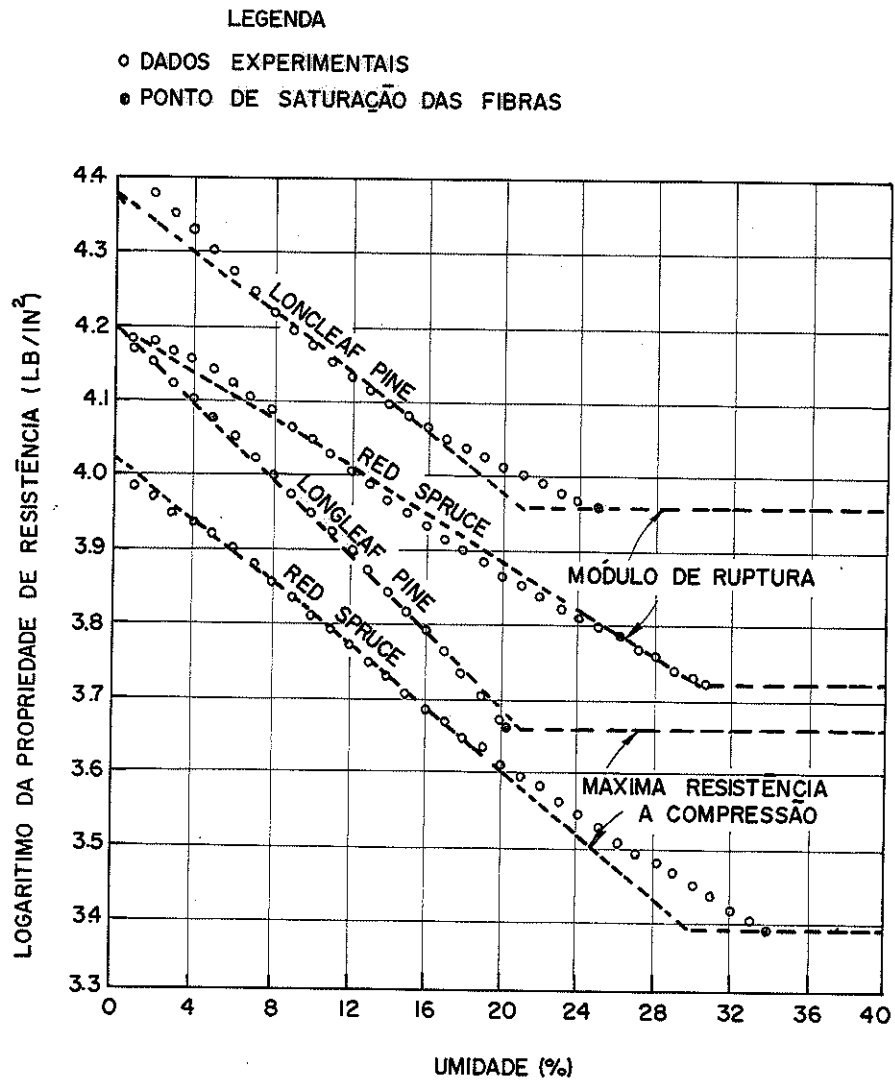


Fig.2.11- Curva Típica Resistência - Umidade plotado em mo no-log.

WILSON, CARLSON e LUXFORD (27), já em 1960, admitiram muita importância para a climitização no estabelecimento da variação das propriedades de resistência com a umidade na madeira. Foi possível a constatação de ligeira variação nas propriedades de resistência, em níveis de umidade acima do ponto de saturação das fibras, uma vez não perfeitamente climatizadas os corpos de prova. As curvas convencionais não evidenciam variação na resistência da madeira quando a umidade é reduzida até o ponto de saturação. Todavia, na observação dos referidos autores, este fato ocorre em peças de madeira de pequenas dimensões (corpos de prova empregados nas determinações de laboratório, por exemplo), pois em peças de dimensões estruturais não climatizadas, existiria um gradiente de umidade: na periferia da seção, umidade mais reduzida; nas posições internas, umidade mais elevada. Foram apresentados gráficos esclarecendo esta colocação, um deles é mostrado na figura 2.13.

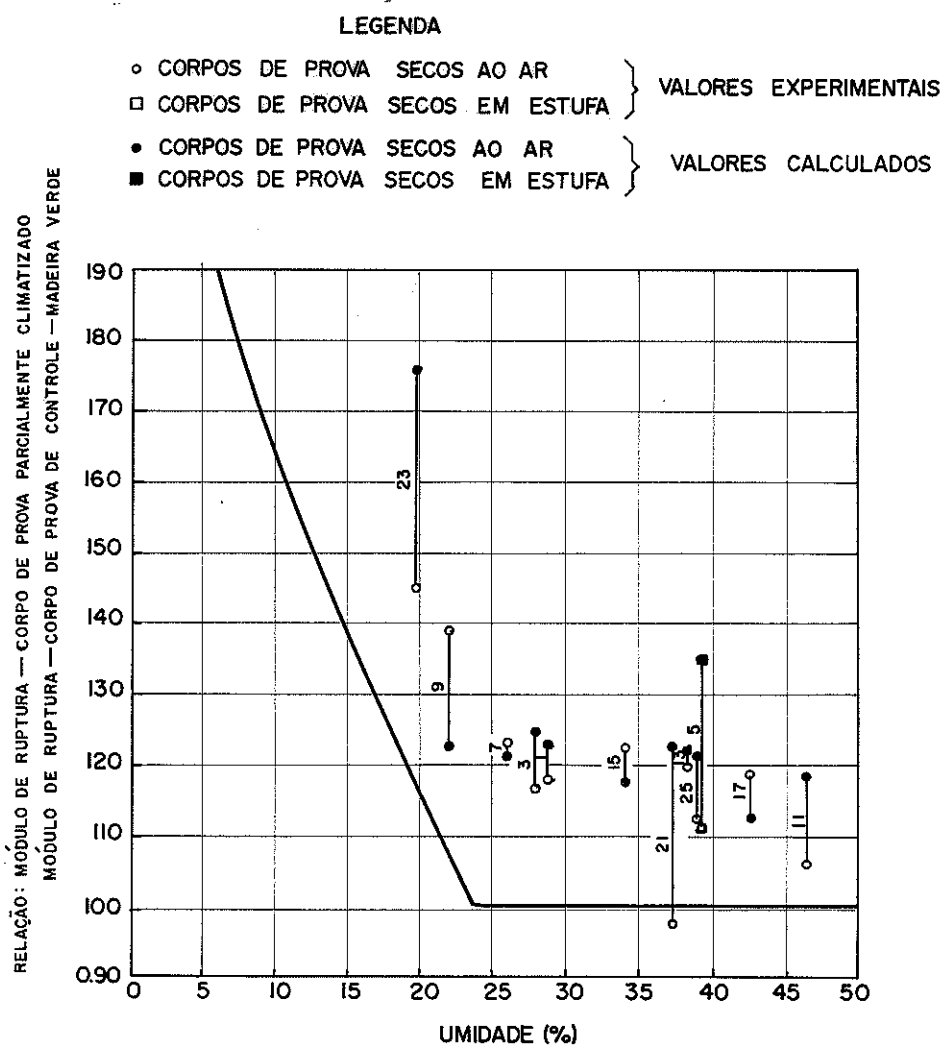


Fig.2.13- Resultados da determinação do módulo de ruptura da espécie chestnut.

JOHNSON (14), em 1965, estudou as relações entre as propriedades de resistência e elasticidade à flexão de duas espécies de madeira, empregando corpos de prova saturados e corpos de prova secos ao ar, climatizados ou não. Os resultados evidenciaram um acréscimo no módulo de ruptura à flexão de aproximadamente 43% e um acréscimo no módulo de elasticidade à flexão ao redor de 18%, considerando-se madeira seca em relação à saturada. Neste trabalho não há referência à variação das propriedades de elasticidade em níveis de umidade acima do ponto de saturação das fibras, embora seja ressaltado o fato de não haver variação nas propriedades de resistência nas citadas condições de umidade da madeira.

ANDREWS (2), em 1967, em texto genérico a respeito da engenharia da madeira, discute apenas qualitativamente o aumento da resistência da madeira com a redução da umidade da peça. Um aspecto interessante levantado pelo autor se refere ao acréscimo de resistência mais significativo em pequenos corpos de prova em relação às peças de dimensões estruturais.

GEHARDS (10), em 1968, apresenta resultados de ensaios realizados em 64 pares de amostras de "Southern Pine", conífera, relacionando a densidade básica da madeira e o módulo de elasticidade à flexão. Foi determinada através de regressão linear, expressão relacionando os parâmetros citados. Também é apresentada uma expressão obtida através de regressão linear múltipla relacionando a densidade básica, o módulo de elasticidade à flexão e a razão vão livre-altura da viga, resultando num coeficiente de correlação mais elevado, em relação ao inicial.

Ainda GEHARDS (9), em 1970, apresentou um trabalho onde é discutida a dependência do módulo de elasticidade e da resistência à flexão de peças de dimensões estruturais, em relação à densidade básica da madeira.

Foi possível concluir que o módulo de elasticidade cresceu 23%, quando a porcentagem de umidade passou dos níveis de madeira verde (acima de 30%) para a porcentagem de equilíbrio ao ar (em torno de 12%). Também se concluiu pelo aumento do módulo de ruptura à flexão em 30%, quando a porcentagem de umidade sofreu a mesma variação citada. As restrições a este trabalho estão concentradas no fato de terem sido realizados ensaios sobre corpos de uma única espécie de madeira e não ter sido utilizada, nestes ensaios, a relação vão livre-altura da viga onde a in-

fluência das deformações tangenciais na deflexão total da peça ensaiada fosse desprezível.

HELLMEISTER (11), em 1973, apresenta algumas idéias a respeito da variação da resistência da madeira à compressão paralela às fibras, em função da porcentagem de umidade. Para tal o autor adotou chamado "coeficiente de influência da umidade", de acordo com as indicações da NBR 6230: Método Brasileiro para Ensaio Físico e Mecânico de Madeiras, isto é: "do trecho aproximadamente retilíneo do diagrama tensão de ruptura à compressão contra a porcentagem de umidade, entre 10 e 20% de umidade, tira-se um fator de correção que permite com suficiente aproximação, referir-se às resistências obtidas para madeiras seca ao ar, com teor normal de 15% de umidade", ver figura 2.14.

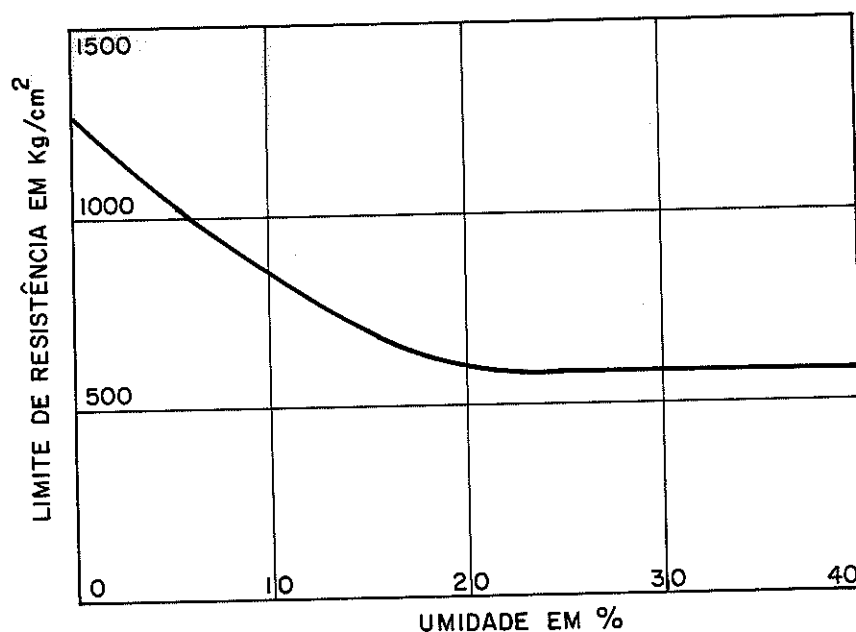


Fig.2.14- Limite de resistência em função da umidade

HOYLE (12), em 1972 atentou para a importância da influência da umidade na madeira mostrando que as propriedades da madeira são afetadas pela temperatura e umidade, sendo a madeira bastante sensível tanto à variação de umidade quanto à de vapor do ar. Afirma que a umidade é, talvez, o fator ambiental que mais afeta a madeira, por ser a madeira um material altamente higroscópico.

Faz considerações a respeito da umidade da madeira em diferentes aplicações: quando em paredes exteriores de edifícios umidade em torno de 10 a 12%; para móveis ou paredes interiores de

edifícios, na maior parte dos Estados Unidos, em torno de 6 a 7% ; para barcos, ou qualquer outra estrutura exposta diretamente à água, umidade em torno de 100%. A tabela 1 e a figura 2.16 apresentadas no referido trabalho e aqui transportadas ilustram os fatos citados.

Para uma explicação destas diferenças na porcentagem de umidade e das consequências nas propriedades da madeira, atentam para a importância de se saber como a água ocorre madeira e para isto utilizaram o diagrama apresentado na figura 2.15.

Tabela 1- Valores da umidade recomendados para várias espécies e várias instalações.

Porcentagem de umidade para						
USO DA MADEIRA	Estados Sudoeste secos (1)		Estado da Costa Sul Úmidos(1)		Demais Estados (1)	
	média (2)	peças individuais	média (2)	peças individuais	média (2)	peças individuais
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Acabamentos interiores, esquadrias e pisos	6	4-9	11	8-13	8	5-10
Pisos de madeira dura	6	5-8	10	9-12	7	6-9
Acabamento exteriores e painéis (3)	9	7-12	12	9-14	12	9-14

Legenda:

- (1) - Para a observação dos contornos, ver figura 2.16.
- (2) - Em geral, a umidade média tem menor significância do que o limite de umidade permitido para peças individuais. Se os valores de umidade das peças de um lote estiverem contidos entre os limites prescritos, o lote todo é aceito, não im -

portando se a umidade média também está.

- (3) - Madeiras estruturais com umidade alta são comumente usadas nas construções pois nem sempre se dispõe de material com a umidade especificada.

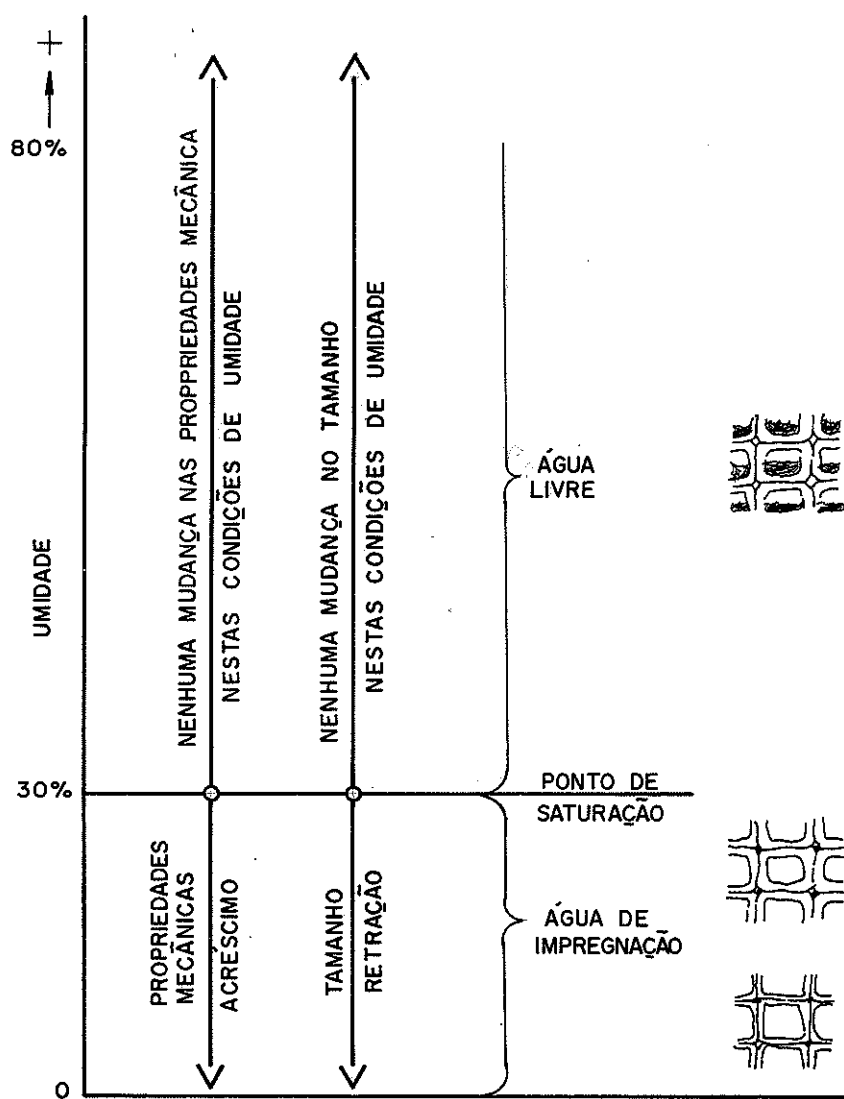


Fig.2.15- Diagrama indicando as mudanças ocorridas no tamanho e resistência da madeira com a variação da umidade.

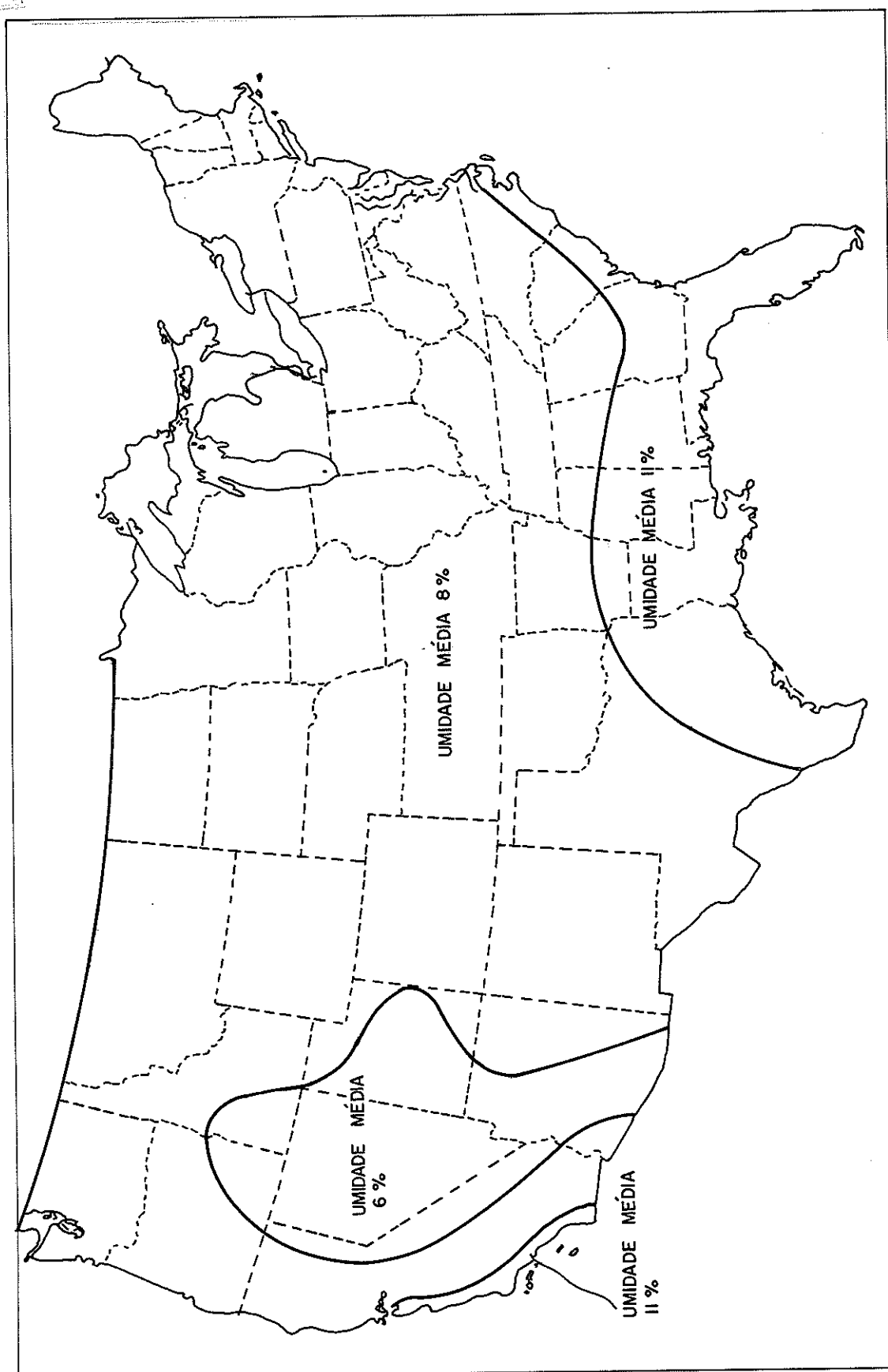


Fig.2.16- Porcentagem de umidade média recomendada para madeira de acabamento para emprego em várias regiões dos Estados Unidos.

O LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS (FLP - USDA) (8), publicou em 1974 texto básico a respeito do emprego da madeira para fins ligados à engenharia. São apresentadas relações lineares entre a umidade da madeira e as propriedades de resistência, embora não seja perfeitamente esclarecida a experimentação geradora das informações mencionadas.

Considerações semelhantes são exaradas por KARLSEN e seus colaboradores (15), em 1967; pelo AMERICAM INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION em texto de 1974 (1); e por OZELTON e BAIRD, em trabalho publicado em 1976 (21).

BENDTSEN E GALLIGAN (3), em 1978, foram mais específicos e, tendo ensaiado corpos de prova à compressão e à tração paralela às fibras, ao cisalhamento e a flexão concluíram pelos seguintes acréscimos de resistência, em média, para quatro espécies de coníferas ensaiadas, quando a porcentagem de umidade passou dos níveis de madeira verde para madeira em equilíbrio ao ar:

- . compressão paralela às fibras: 75%
- . tração paralela às fibras: 53%
- . flexão estática: 35%
- . cisalhamento paralelo às fibras: 13%

COVINGTON e FEWELL (4), em 1975, constataram a variação da porcentagem de umidade causando variação nas propriedades geométricas (momento de inércia), nas propriedades de elasticidade (módulo de elasticidade) e, conseqüentemente, no produto de rigidez das peças de madeira. São examinadas as extensões e as implicações da variação do produto de rigidez no dimensionamento de peças estruturais de madeira e na operação das máquinas para a classificação das referidas peças. É sugerida a adoção de uma expressão envolvendo logaritmo para relacionar o módulo de elasticidade e a umidade do material, onde há a introdução de constante em função da espécie de madeira em estudo, providência inconveniente para a generalização da expressão.

PIGOZZO (22), em 1982, desenvolveu pesquisa experimental buscando relacionar a resistência à compressão paralela às fibras, a umidade e a densidade da madeira. Para isto realizou ensaios em corpos de prova de dimensões 3x3x12 cm e 5x5x20 cm de Peroba Rosa e em corpos de prova de 2x2x3 cm de Pinho do Paraná e Eucalipto Citriodora, variando umidade e densidade.

Com os resultados obtidos procedeu a análise estatística.

Após acurada manipulação de variáveis, adequadamente transformadas para alcançar melhor ajuste do modelo aos resultados experimentais chegou às expressões:

. Para a Peroba Rosa

$$\frac{\log T}{D} = 0,65306 - 0,03333U^2 + 0,00046U + 2,45121D^{-1}$$

com coeficiente de correlação $R^2 = 0,9607$

. Para o Pinho do Paraná

$$\frac{\log T}{D} = 1,41969 - 0,4797U + 0,00050U^2 + 2,19141D^{-1}$$

com coeficiente de correlação $R^2 = 0,9741$

. Para Eucalipto Citriodora

$$\frac{\log T}{D} = 0,92143 - 0,3157U + 0,00053U^2 + 2,34034D^{-1}$$

com coeficiente de correlação $R^2 = 0,9876$

T = tensão de ruptura a compressão paralela às fibras
(kgf/cm²)

U = umidade dos corpos de prova (%)

D = densidade aparente (g/cm³)

A partir do estudo dos resíduos concluiu que o modelo estatístico:

$$\log T = A + \beta_1 U + \beta_2 U^2 + \beta_3 D^{-1}$$

ajustou-se satisfatoriamente aos dados obtidos nos ensaios para todas as espécies. Acima do ponto de saturação, admite-se a tensão de ruptura constante, não sofrendo mais influência da umidade e densidade.

A partir destes modelos foram construídas curvas, como as apresentadas nas figuras 2.17 e 2.18, para todas as espécies.

$1.00 \text{ Kgf/cm}^2 = 0.0981 \text{ N/mm}^2$

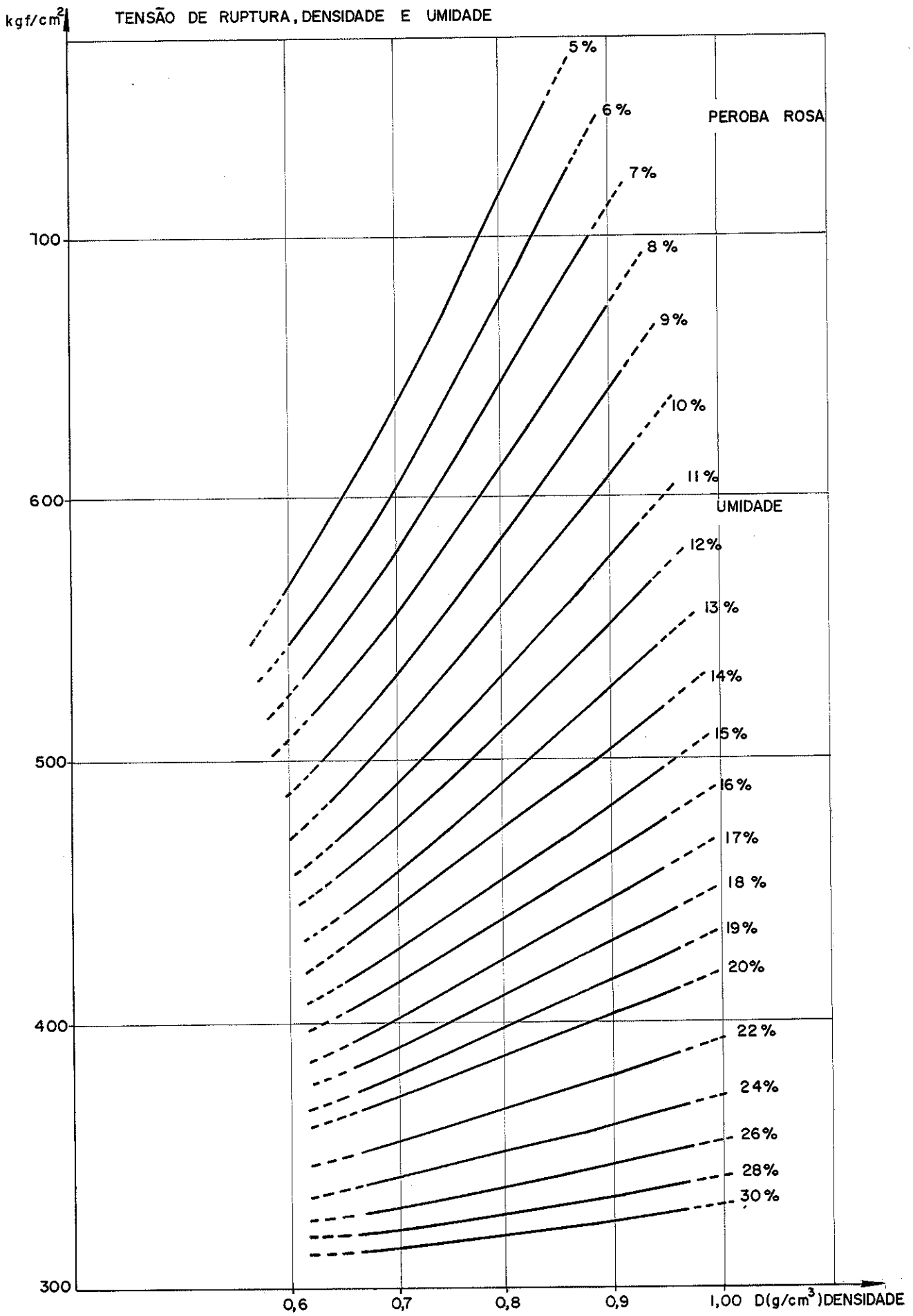


Fig.217-

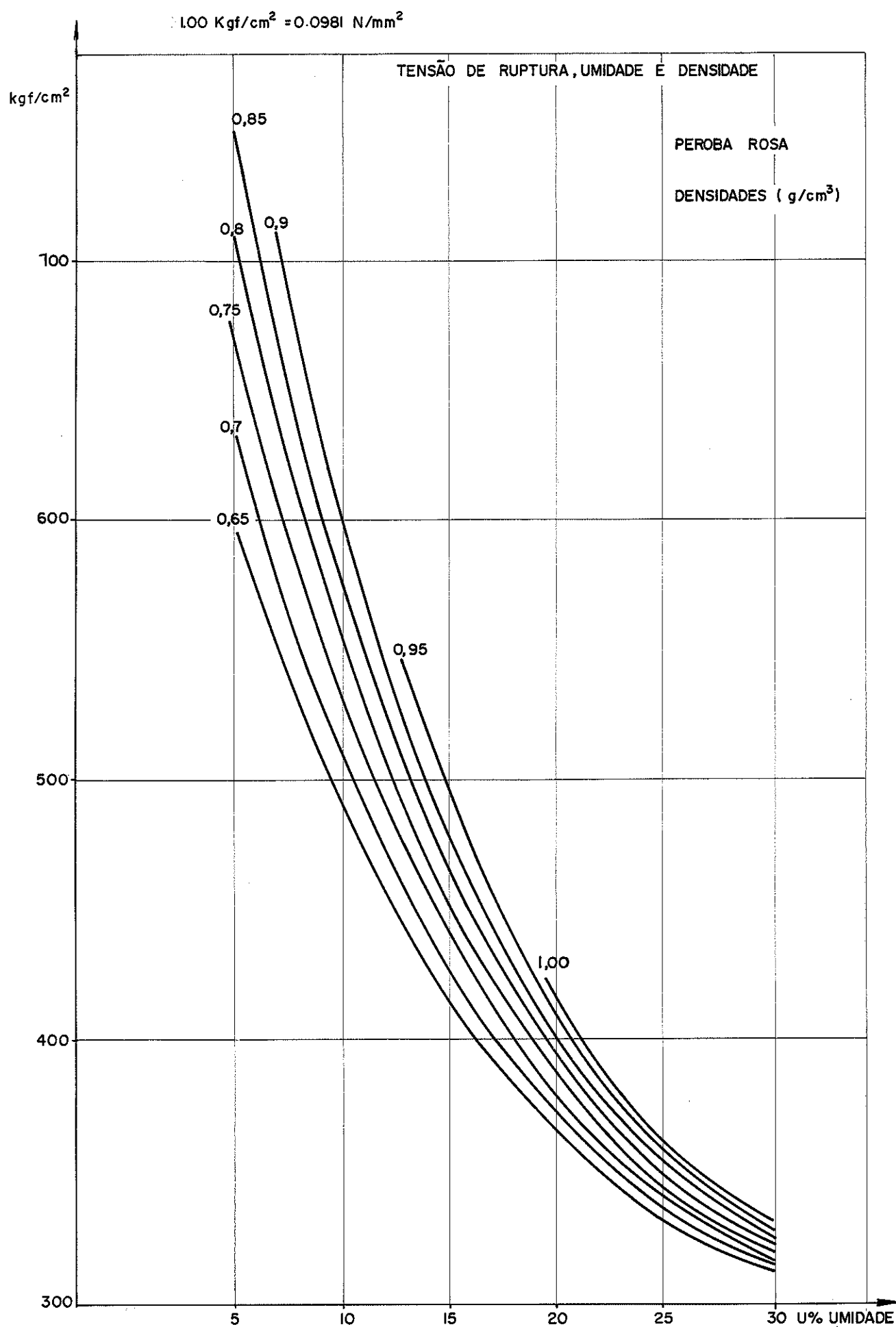


Fig.2.18-

Para determinar a relação entre o módulo de elasticidade, a umidade, a densidade e tensão de ruptura na compressão, Pigozzo desenvolveu um modelo matemático a partir dos resultados de 305 ensaios. A análise de regressão múltipla foi feita usando o método dos mínimos quadrados. Após demorada manipulação das variáveis, chegou à seguinte expressão:

$$\frac{U}{E} = -6354,33462 + 382,95770U + 44,4755T^{-1} - 1,68951UT$$

com coeficiente de correlação $R^2 = 0,8444$

Observou o autor, no decorrer desta análise, o efeito não significativo da densidade sobre o módulo de elasticidade, por isso a variável densidade não foi considerada no modelo. Para umidades acima de 35% os estudos em modelos anteriores mostram uma nítida perturbação nos resíduos, os quais apresentaram todos valores positivos e não distribuídos em torno do valor médio, igual a zero. Esta tendência sugeriu uma separação do modelo adotado, em duas partes: uma para umidades acima de 35% e outra para umidade até 35%. Considerando-se, porém, as poucas observações feitas em umidades e levadas, o modelo desenvolvido foi admitido válido para umidades entre 5 e 35%.

Os resultados da análise indicaram o ajuste satisfatório do modelo adotado. Resumo da análise permitiu a construção de diagramas como o mostrado na figura 2.19.

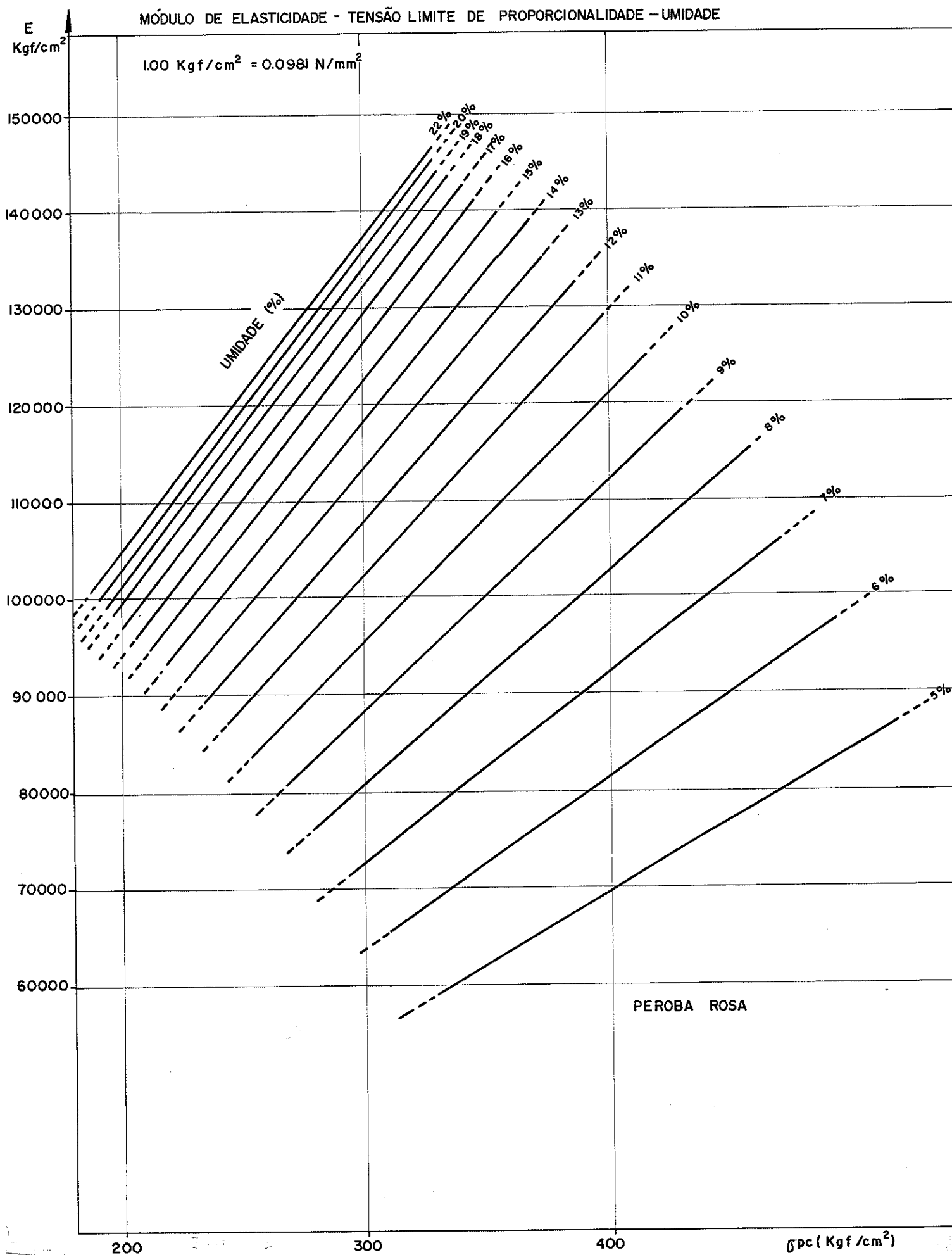


Fig.2.19-

MENDES (19), em 1984, estudou a influência da umidade e da densidade na resistência ao cisalhamento da madeira. Inicialmente comentou a escassez de referências bibliográficas ao estudo da densidade e da umidade no cisalhamento.

Em seguida, apresenta resultados citados na publicação Wood Handbook, onde a correção da tensão de cisalhamento em função da umidade é: "Para um aumento de 1% no teor de umidade da madeira deverá haver um decréscimo de 3% na tensão de cisalhamento".

Para o estudo desta influência nas madeiras nacionais o autor ensaiou 56 corpos de prova em sete níveis de umidade 0,5,10, 15,20,25 e 30%, dois por barra e por umidade. Os corpos de prova ensaiados foram de peroba rosa, jatobá e pinho do paranã.

Mendes, na análise estatística dos resultados, apresentou modelos matemáticos relacionando as variáveis citadas.

Foram adotados os seguintes modelos:

τ = tensão de ruptura ao cisalhamento

U = umidades dos corpos de prova

D = densidade aparente

. para o pinho do paranã

$$\log \tau = 2,45 - 0,0431UD + 0,0004U^2D$$

$$R^2 = 0,95$$

. para a Peroba Rosa

$$\log \tau = 1,72D - 0,0129UD$$

$$R^2 = 0,85$$

. para o Jatobá

$$\log \tau = 1,55D - 0,0103UD$$

$$R^2 = 0,71$$

Com o intuito de facilitar a aplicação das equações de regressão apresentadas, Mendes traçou gráficos da resistência x teor de umidade para as diversas densidades e para cada espécie e, também, gráficos da resistência x densidade para as diversas umidades para cada espécie; exemplos destes gráficos são mostrados nas figuras 2.20 e 2.21.

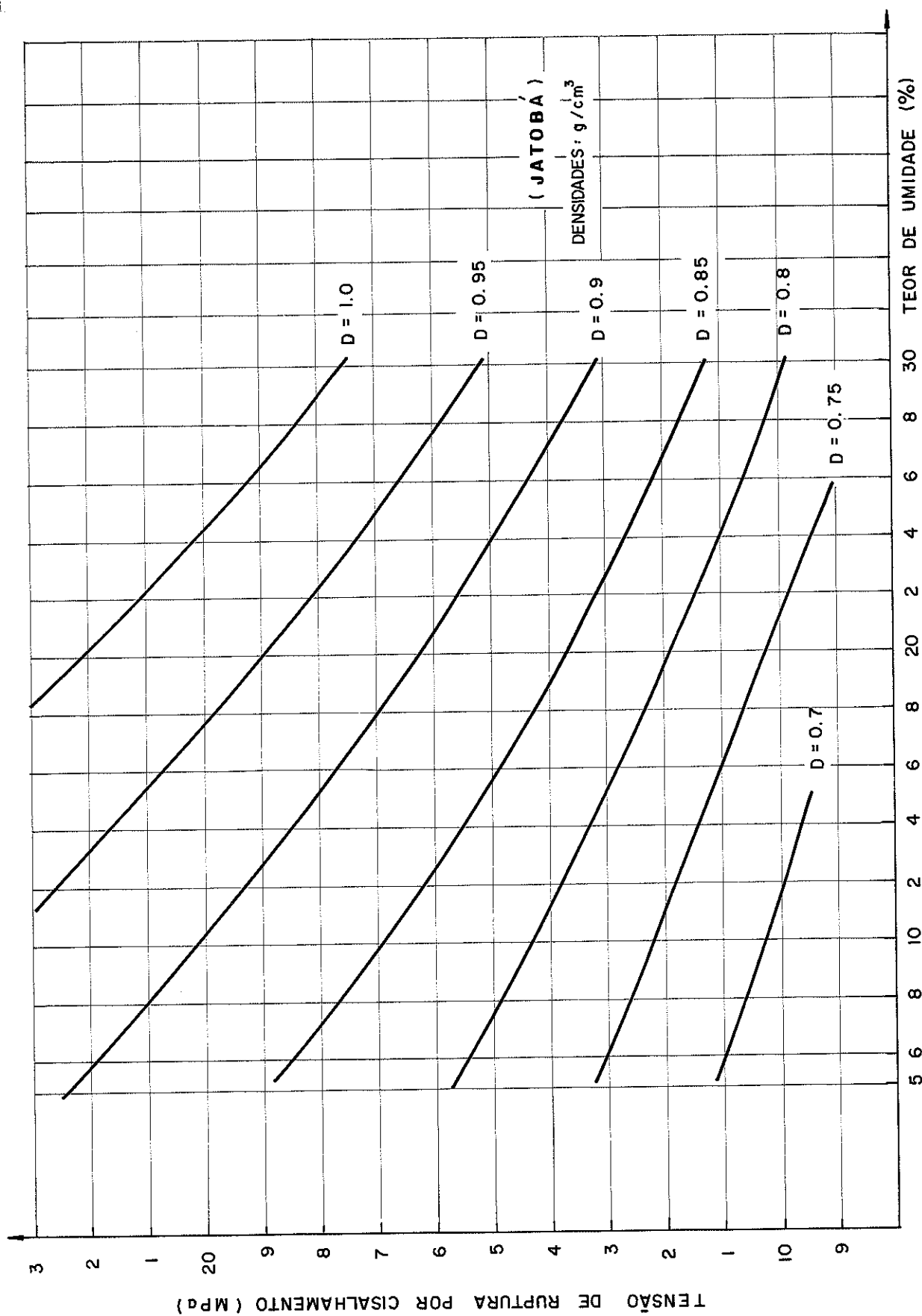


Fig.2.20- Diagrama tensão de ruptura x teor de umidade

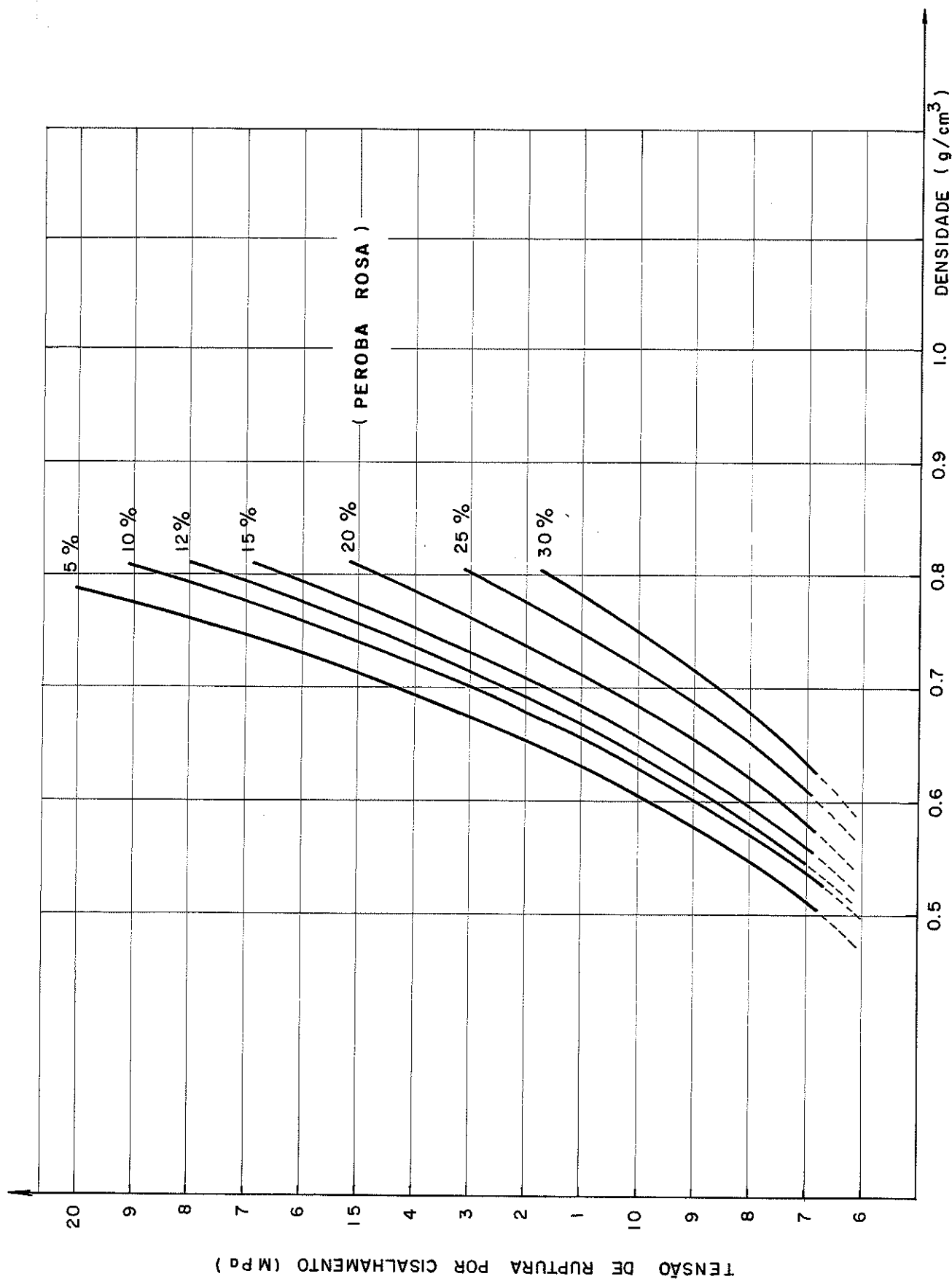


Fig.221- Diagrama de tensão de ruptura x densidade

MCLAIN, DE BONIS, GREEN, WILSON, LENK (18), em fins de 1984, apresentaram resultados de um programa experimental para avaliar o efeito do teor de umidade nas propriedades de flexão de peças de dimensões estruturais de Pinho do Sul. Explicam que o estudo, se fez devido às discrepâncias entre os conceitos de projeto correntemente aceitos e evidências de recentes pesquisas. Os referidos resultados deverão ser usados pelo Forest Products Laboratory para desenvolver procedimentos a fim de ajustar os dados comumente gerados na indústria madeireira e no serviço florestal americano, bem como no programa de ensaios de classificação de peças.

Peças de três classes (1,2,3) e três tamanhos (5x10;5x15; 5x20cm) foram amostradas de uma determinada região geográfica. Para cada par classe-tamanho, a amostra foi dividida, ainda na condição verde, em quatro populações equivalentes, com o objetivo de estimar a resistência e a rigidez das peças de madeira submetida à flexão. Três dos grupos foram então conduzidos a umidades de 10-15 20%. Todas as amostras foram ensaiadas como tábua, com duas cargas equidistantes dos apoios.

A partir de comparações de média e do quantil inferior de 5% do módulo de ruptura (MOR) e da média dos módulos de elasticidade (MOE) os autores apresentam as seguintes observações:

. Em geral, o aumento na média de MOR e da média de MOE foi em função da classe e do tamanho. As maiores larguras e as classes mais baixas foram menos afetadas pela redução da umidade que as classes mais altas e as menores larguras. Todavia, o teor de umidade, a classe e o tamanho tiveram um efeito significativo nos valores médios e, para MOR, houve uma significativa correlação entre classe e teor de umidade.

. Embora tivesse havido variação em função da classe e do tamanho, o incremento médio da média de MOR para as nove combinações de classe-tamanho foi aproximadamente:

11% - quando a umidade passou das condições de madeira verde para 20%

35% - quando a umidade passou das condições de madeira verde para 10%

. Para peças de classe 1, o quantil de 5% de MOR exibe um significativo, mas irregular, aumento com a redução da umidade. Por exemplo, quando a umidade passa das condições de madeira verde para 15%, o aumento da resistência excede a 40%. O quantil de 5%

da resistência nas classes 2 e 3 foi menos sensível à umidade do que as peças das classe 1. Nas peças (5x20) cm, classe 3, redução do quantil de 5% de MOR foi observada em cada nível sucessivo de umidade.

. A classe e o tamanho têm pequeno efeito no aumento médio da média dos valores de MOE. Em geral, os acréscimos na média de MOE com a redução da umidade foram:

5% - de verde a 20% de umidade

22% - de verde a 15% de umidade

25% - de verde a 10% de umidade

. Para grande parte das combinações tamanho-classe, a redução de 15% para 10% de umidade tem pequeno efeito no quantil de 5% para MOR e para a média de MOE.

A análise da capacidade resistente ($RS=MOR.W$) e rigidez ($E/MOE.I$) indicou:

. A média de EI não foi afetada redução de umidade.

. A média e o quantil de 5% de RS foram afetados pelo teor de umidade da mesma maneira que MOR, embora em menor intensidade para RS. O aumento no quantil de 5% foi aproximadamente 10% inferior ao observado para o quantil de 5% de MOR, quando a madeira passa das condições verdes para 15%.

Com base no exame da distribuição experimental de frequências acumuladas, concluíram:

. Em geral, o efeito do teor de umidade na resistência foi mais alto nos quantis superiores, para as classes 2 e 3, a distribuição de frequência acumulada para os grupos de 10 a 15% em geral cruzam. Abaixo do quantil de 5%, o grupo de 10% de umidade foi, frequentemente, mais fraco em relação ao grupo de 15%.

. A redução da umidade aumenta MOE em todos os níveis da distribuição de frequência acumulada.

. O maior aumento em MOR e MOE em geral ocorreu quando a umidade passou de 20 para 15%.

. MOE em geral tem distribuição normal. Porém, com algumas distribuições de MOR a normalização pode ser rejeitada.

Com base nestes resultados, conclui-se:

. Em geral, a redução de umidade melhora as propriedades à flexão.

. Aumentos em MOR e MOE com a relação de umidade são significativos para peças classe 1, praticamente em todos os níveis de

distribuição de frequência acumulada. A ordem de grandeza dos aumentos na resistência decresce com o decréscimo da qualidade e com o acréscimo da largura.

. O efeito da umidade em MOE é independente da qualidade e do tamanho.

. A redução de umidade da madeira para valores abaixo de 15% não pode ser justificada com base no aumento das propriedades de resistência e elasticidade à flexão.

. A ocorrência de distribuição assimétrica pode fazer, em alguns casos, inadequados o uso da distribuição log-normal para estudos probabilísticos de segurança com relação às propriedades da madeira.

MASCIA (17), em 1985, apresentou em sua dissertação de mestrado, densa pesquisa bibliográfica e experimental a respeito da flexão estática em peças de madeira. Preocupado inicialmente com a incompatibilidade entre os critérios para o cálculo de elementos estruturais de madeira propostos pela NBR 7190/82 - Norma Brasileira para o Cálculo e a Execução de Estruturas de Madeira - e os conceitos semi-probabilísticos de segurança estrutural; preocupado também com algumas indicações discutíveis do NBR 6230/80-Método Brasileiro para Ensaios Físicos e Mecânicos de Madeiras-, Mascia desenvolveu interessante trabalho abrangendo diversos aspectos ligados à proposta de metodologia de ensaio para peças de madeira submetidas à flexão e também ao cálculo de peças estruturais de madeira na flexão.

No final das observações realizadas, muitas conclusões e proposições foram alcançadas. Aqui são citadas apenas as mais concernentes com os objetivos da presente dissertação:

. Os parâmetros de elasticidade longitudinal da madeira são bons estimadores do parâmetro referente à ruptura na flexão estática, sendo altamente satisfatório o modelo linear para correlacionar os referidos parâmetros.

. A adoção de seis corpos de prova para estabelecer uma função estimadora para os valores médios de resistência através de parâmetros de elasticidade revela-se estatisticamente adequada.

. Não há variação estatisticamente significativa nos valores dos módulos de elasticidade longitudinais quando os ensaios são realizados com a aplicação de uma carga central ou de duas cargas equidistantes dos apoios, respeitada a relação vão livre-altu-

ra da peça superior a 2l.

. Com base na análise estatística dos resultados dos ensaios da experimentação realizada, não há variação estatisticamente significativa no módulo de ruptura à flexão para corpos de prova de 2x2x30 cm (NBR 6230) em relação aos corpos de prova de 5x5x120 cm (proposto no trabalho).

. Com base na análise estatística dos resultados dos ensaios da experimentação realizada, não há variação estatisticamente significativa no módulo de elasticidade longitudinal da madeira quando se comparam os valores obtidos a partir de corpos de prova de 2x2x30 cm com os valores obtidos a partir de corpos de prova de 5x5x120 cm.

Deve ser salientado o fato de diversas conclusões do trabalho de Mascia terem sido admitidas no planejamento e no desenvolvimento da parte experimental desta dissertação, sendo oportunamente mencionadas.

3- INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA DENSIDADE NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO

3.1- INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os procedimentos experimentais adotados para a determinação da influência da umidade e da densidade na resistência à flexão de peças de madeira. Os motivos do interesse pela mencionada determinação estão detalhados no capítulo 1.

3.2- EXPERIMENTAÇÃO REALIZADA

3.2.1- Generalidades

A experimentação realizada, desde seu planejamento até a análise estatística dos resultados obtidos, envolveu o ensaio de peças de madeira à flexão estática, promovendo a variação da umidade e densidade, com o intuito de se proceder ao estudo da influência desses parâmetros na resistência da madeira à flexão. Deve ser observado que, no transcorrer do trabalho, em diversos momentos os conceitos de densidade e peso específico são tomados como equivalentes.

3.2.2- Planejamento da experimentação

Na fase de planejamento da experimentação a realizar foram levadas em consideração as diversas indicações de Mascia, relativas ao tamanho e outras características dos corpos de prova, conforme a citação na revisão bibliográfica, capítulo 2. Foi prevista a utilização de espécies de madeira não só de florestas nativas como também de florestas artificiais, procurando alcançar abrangente gama de densidade e incluindo, simultaneamente, espécies das coníferas e das dicotiledôneas. O material foi adquirido em diversas serrarias de São Carlos, SP, em épocas distintas, na tentativa de garantir a aleatoriedade da amostra. A quantidade de corpos de prova ensaiados antighiu valores suficientes para se promover a adequada análise estatística dos resultados experimentais.

3.2.3- Material utilizado

Para a execução da experimentação, empregaram-se madeiras com densidades variando de 0,4 a 1,2 g/cm³. Em relação à umidade, foi procedido um controle para se obter desde corpos de prova completamente secos (0% de umidade) até a umidade equivalente ao ponto de saturação das fibras e, por vezes, acima dela.

As espécies e as quantidades de corpos de prova ensaiados foram os seguintes:

- . Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*): 117 corpos de prova
- . Eucalyptus Tereticornis (*Eucalyptus tereticornis*): 30 corpos de prova
- . Pinus Elliotti (*Pinus elliotti*): 106 corpos de prova.

Por razões já descritas, baseadas principalmente nas recomendações de Mascia, os corpos de prova utilizados eram de dimensões nominais 2x2x30 centímetros. Estes foram retirados de vigas de seção transversal nominal 6x12 centímetros e diversos comprimentos.

3.2.4- Descrição dos ensaios realizados

Os corpos de prova foram ensaiados segundo as indicações da NBR 6230 - Métodos Brasileiros para Ensaio Físicos e Mecânicos de Madeiras. Os ensaios foram realizados na Máquina Universal AMSLER, de 250 KN, com metodologia a seguir sumarizada.

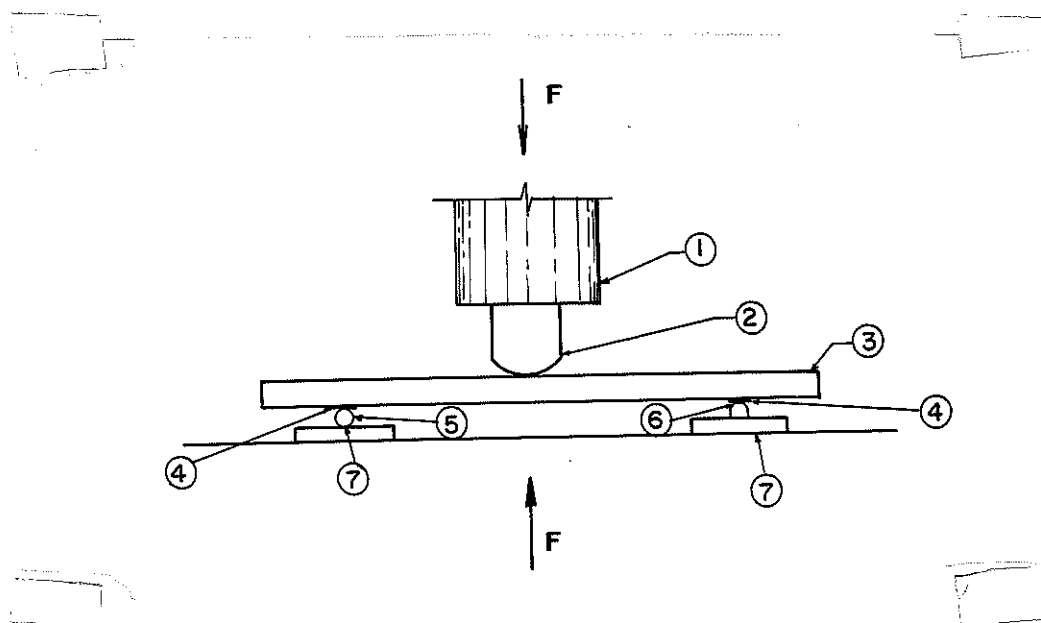


Fig.3.1- Esquema de ensaio

Legenda: 1- Sistema de carregamento

2- Cutelo

3- Corpo de prova

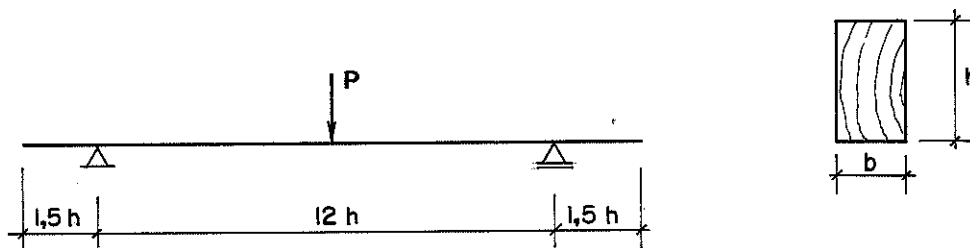
4- Placa

5- Apoio móvel

6- Apoio fixo

7- Placa de apoio

O esquema estático representado foi retirado do item 10 da NBR 6230.



Deste ensaio é obtido o valor do módulo de resistência à flexão, aqui representado por MRF, calculado pela expressão:

$$\text{MRF} = \frac{18P}{bh} \dots\dots\dots (3.1)$$

onde b = largura da seção transversal da peça
 h = altura da seção transversal da peça
 P = carga de ruptura.

A equação 3.1 se obtém substituindo os valores b , h e P na equação clássica da teoria elástica $\sigma = \frac{M}{I} y$. Esta impropriedade originou a expressão módulo de resistência à flexão, utilizada em lugar da resistência à flexão, mencionada na NBR 6230.

Com relação à velocidade do ensaio, salienta-se o fato de a aplicação da carga ter sido feita segundo a NBR 6230, item 10 b, isto é, a ruptura não ocorreu em tempo inferior a dois minutos.

3.2.5- Controle da umidade

Para se proceder ao controle da umidade, de cada viga foram retirados alguns corpos de prova como testemunhos. Estes foram levados à estufa e secos até 0% de umidade, obtendo-se o peso seco (PS).

Todos os demais corpos de prova foram previamente pesados, obtendo-se o seu peso na umidade em que se encontravam na viga (PU).

Com a expressão

$$\%U = \frac{PU-PS}{PS} \times 100 \dots\dots\dots (3.2)$$

foi obtida para cada testemunho a porcentagem de umidade (%U). A média das porcentagens de umidade dos testemunhos de cada viga foi considerada como umidade da viga.

De posse da porcentagem de umidade de cada corpo de prova no instante da pesagem (%U) e do seu peso no mesmo instante (PU), pela equação 3.2 determina-se o peso seco (PS) estimado de cada corpo de prova. Desta forma é possível se obter corpos de prova nas umidades desejadas para a realização dos ensaios.

Depois de ensaiados, os corpos de prova foram levados à estufa para secagem a 0% de umidade para se verificar eventuais diferenças entre os valores estimados e os valores efetivos da porcentagem de umidade. Tais diferenças foram consideradas desprezíveis.

Para se alcançar umidades superiores, os corpos de prova eram imersos em água por diferentes intervalos de tempo. Para se alcançar umidade inferiores às das vigas, os corpos de prova eram colocados em estufa a diferentes temperaturas e em diferentes intervalos de tempo.

3.2.6- Determinação da densidade

Imediatamente antes da realização dos ensaios de flexão os corpos de prova eram pesados e suas dimensões medidas com precisão 0,1 milímetro. Deste modo foi possível a determinação da densidade da madeira nos diversos níveis de umidade dos corpos de prova, simplesmente dividindo-se sua massa pelo volume no instante correspondente.

3.3- APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NA EXPERIMENTAÇÃO

Com o material utilizado e segundo a metodologia de ensaio descrita nos itens anteriores deste capítulo foram obtidos os resultados para os parâmetros de ruptura em função da umidade e da densidade.

Estes resultados foram agrupados em tabelas. Estas tabe-

las estão divididas por espécies e algumas das espécies divididas por vigas. Isto porque, como será visto em itens posteriores, a análise de resultados foi realizada, inicialmente, por espécie e por vigas em separado, para depois ser generalizada. As diversas colunas representam:

CP - identificação do corpo de prova

U - umidade

D - densidade

MRF- módulo de resistência à flexão

3.3.1- Espécie - Jatobá

3.3.1.1- Viga 1

C.P. nº	U (%)	D (g/cm ³)	MRF (MPa)
1	15,8	0,91	105
2	9,6	0,83	122
3	24,7	0,98	112
4	22,9	0,95	111
5	9,9	0,88	137
6	15,2	0,86	125
7	12,5	0,91	141
8	17,0	0,90	113
9	44,6	1,01	89
10	18,9	0,91	112

3.3.1.2- Viga 2

C.P. nº	U (%)	D (g/cm ³)	MRF (MPa)
1	12,0	0,87	161
2	18,6	1,03	136
3	30,9	1,06	96
4	41,5	1,04	88
5	26,2	0,99	97
6	10,2	0,97	129
7	8,5	0,87	154
8	21,0	1,02	116
9	31,1	1,08	106
10	36,2	1,07	91
11	16,1	0,97	128

3.3.1.3- Viga 3

C.P. nº	U (%)	D (g/cm ³)	MRF (MPa)
1	45,8	1,13	119
2	3,5	0,82	136
3	0,0	0,97	204
4	33,3	1,03	123
5	32,1	1,04	119
6	6,5	0,91	157
7	25,2	0,89	101
8	5,6	0,79	155
9	5,4	0,84	173

3.3.1.4- Viga 4

C.P. nº	U (%)	D (g/cm ³)	MRF (MPa)
1	7,1	0,89	178
2	25,5	0,95	129
3	23,6	0,99	121
4	21,2	0,97	146
5	0,0	0,98	226
6	30,6	1,02	133
7	5,5	0,86	194
8	33,0	1,07	143
9	36,2	1,01	117
10	32,9	1,07	135
11	32,7	1,08	132
12	10,1	0,86	174
13	13,7	0,92	153
14	5,4	0,88	214
15	3,1	0,86	215

3.3.1.5- Viga 5

C.P. nº	U (%)	D (g/cm ³)	MRF (MPa)
1	13,7	1,01	208
2	28,5	1,13	172
3	3,0	0,98	265
4	11,4	1,00	209
5	25,3	1,11	180
6	0,0	1,12	305
7	29,7	1,11	181
8	5,4	1,01	245
9	6,9	0,99	235
10	30,6	1,12	162

3.3.1.6- Viga 6

C.P. nº	U (%)	D (g/cm ³)	MRF (MPa)
1	16,9	0,87	130
2	36,8	1,06	119
3	29,8	1,05	99
4	17,7	0,88	144
5	13,9	0,90	140
6	23,9	0,99	100
7	1,3	0,81	181
8	0,0	0,83	169
9	6,7	0,84	145

3.3.1.7- Viga 7

C.P. nº	U (%)	D (g/cm ³)	MRF (MPa)
1	3,9	0,89	134
2	17,2	0,99	126
3	25,6	1,06	104
4	26,3	1,05	111
5	6,5	0,89	124
6	9,0	0,91	139
7	26,6	1,06	113
8	2,0	0,87	141
9	6,8	0,92	142
10	3,2	0,85	163
11	9,3	0,88	143

3.3.1.8- Viga 8

C.P. nº	U (%)	D (g/cm ³)	MRF (MPa)
1	10,2	0,86	135
2	26,1	0,99	136
3	40,9	1,08	109
4	26,2	1,07	123
5	16,8	0,90	149
6	24,5	1,02	118
7	15,7	0,88	143
8	0,0	0,81	173
9	12,4	0,90	140
10	7,6	0,80	169
11	14,3	0,88	140
12	9,7	0,88	158

3.3.1.9- Viga 9

C.P. nº	U (%)	D (g/cm ³)	MRF (MPa)
1	10,0	0,82	136
2	3,8	0,83	147
3	4,7	0,80	135
4	33,9	0,98	104
5	9,7	0,84	117
6	24,9	0,92	101
7	9,0	0,85	135
8	8,45	0,81	156
9	29,8	0,96	98

3.3.1.10- Viga 10

C.P. nº	U (%)	D (g/cm ³)	MRF (MPa)
1	32,3	1,16	140
2	23,0	1,10	110
3	9,2	1,04	162
4	36,0	1,19	100
5	30,1	1,16	125
6	35,6	1,12	120
7	9,9	1,00	144
8	5,5	1,01	169
9	3,8	1,00	169

3.3.1.11- Viga 11

C.P. nº	U (%)	D (g/cm ³)	MRF (MPa)
1	9,5	0,82	134
2	50,5	1,06	90
3	25,1	0,91	102
4	8,8	0,83	172
5	9,2	0,83	157
6	9,2	0,81	136
7	7,7	0,85	173
8	6,1	0,86	163
9	9,8	0,85	158
10	26,3	0,99	116
11	7,9	0,87	151
12	12,4	1,04	162

3.3.2- Espécie: Eucalipto Tereticornis

3.3.2.1- Viga 1

C.P. nº	U (%)	D (g/cm ³)	MRF (MPa)
1	28,0	0,96	68
2	25,7	0,96	59
3	10,8	0,93	90
4	31,6	0,97	59
5	1,6	0,88	115
6	7,6	0,91	103
7	8,6	0,97	94
8	27,5	0,96	100
9	26,7	0,94	75
10	11,7	0,99	130
11	12,3	0,95	143
12	21,9	0,99	98
13	7,0	0,97	183
14	21,6	0,97	99

3.3.2.2- Viga 2

C.P. nº	U (%)	D (g/cm ³)	MRF (MPa)
1	30,2	0,93	89
2	16,8	1,02	90
3	8,0	1,03	141
4	1,9	0,87	95
5	8,0	1,02	107
6	1,0	0,87	170
7	8,8	1,03	129
8	19,2	0,95	107
9	22,8	0,99	105
10	8,1	0,94	149
11	26,8	0,92	89
12	16,7	0,99	112
13	16,7	1,02	110

Continuação

C.P. nº	U (%)	D (g/cm ³)	MRF (MPa)
14	7,7	0,95	117
15	8,6	0,98	148
16	29,2	0,93	98

3.3.3- Espécie: Pinus Elliotii (não dividido por vigas)

C.P. nº	U (%)	D (g/cm ³)	MRF (MPa)
1	42,9	0,83	72
2	39,0	0,80	74
3	32,8	0,78	77
4	11,7	0,45	68
5	11,9	0,48	71
6	11,8	0,53	77
7	11,9	0,52	71
8	11,8	0,56	87
9	11,8	0,41	58
10	12,0	0,73	134
11	12,0	0,58	102
12	12,0	0,59	101
13	12,0	0,45	77
14	12,0	0,70	130
15	12,2	0,52	79
16	36,2	0,78	62
17	40,4	0,83	72
18	19,4	0,61	67
19	17,2	0,48	50
20	16,5	0,59	80
21	17,3	0,59	53
22	20,4	0,42	38
23	7,1	0,66	120
24	7,0	0,44	62
25	7,3	0,51	94
26	7,3	0,45	61

Continuação

C.P. nº	U (%)	D (g/cm ³)	MRF (MPa)
27	8,9	0,74	133
28	8,4	0,49	93
29	8,6	0,51	89
30	9,5	0,59	93
31	9,7	0,75	129
32	9,8	0,56	101
33	9,5	0,46	61
34	8,1	0,44	78
35	8,5	0,46	69
36	8,7	0,50	86
37	8,0	0,44	70
38	9,2	0,61	92
39	2,2	0,42	76
40	3,3	0,40	40
41	6,5	0,38	60
42	7,8	0,63	119
43	7,6	0,44	90
44	2,1	0,40	77
45	1,8	0,54	113
46	2,1	0,44	74
47	2,4	0,54	120
48	2,9	0,43	45
49	6,2	0,41	48
50	7,8	0,50	100
51	32,7	0,65	45
52	17,2	0,47	44
53	29,7	0,54	36
54	18,6	0,56	64
55	16,7	0,54	57
56	15,2	0,53	54
57	19,3	0,52	55
58	24,6	0,46	32
59	28,6	0,54	51
60	15,8	0,47	48
61	33,8	0,51	39

Continuação

C.P. nº	U (%)	D (g/cm ³)	MRF (MPa)
62	16,1	0,43	55
63	30,6	0,45	32
64	23,7	0,50	46
65	16,5	0,41	43
66	25,8	0,52	52
67	16,3	0,57	65
68	16,1	0,49	64
69	25,7	0,48	37
70	19,5	0,59	63
71	32,9	0,52	41
72	25,9	0,49	38
73	0,0	0,43	87
74	0,0	0,37	31
75	27,9	0,45	44
76	39,9	0,54	40
77	24,1	0,53	52
78	27,6	0,52	37
79	0,0	0,46	95
80	0,0	0,55	140
81	6,3	0,60	117
82	0,0	0,64	167
83	0,0	0,36	71
84	0,0	0,66	173
85	5,4	0,44	78
86	0,0	0,42	97
87	0,0	0,45	87
88	0,0	0,60	160
89	0,0	0,36	45
90	0,0	0,47	113
91	0,0	0,65	167
92	0,0	0,63	130
93	0,0	0,47	92
94	8,3	0,55	101
95	30,0	0,46	39
96	7,6	0,61	139

Continuação

C.P. nº	U (%)	D (g/cm ³)	MRF (MPa)
97	5,4	0,56	110
98	5,8	0,59	112
99	6,3	0,45	73
100	6,4	0,45	74
101	4,9	0,42	48
102	4,4	0,47	105
103	6,7	0,44	60
104	5,8	0,58	135
105	8,3	0,58	117
106	6,1	0,35	54

3.4- ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o objetivo de relacionar o parâmetro de resistência da madeira à flexão, aqui denominado MRF, em função da umidade e da densidade, foram utilizados conceitos estatísticos correntes e comumente aceitos em engenharia de estruturas. Nos itens subsequentes são feitas considerações a respeito dos diversos pormenores da análise efetuada.

3.4.1- Tratamento estatístico dos resultados

A partir dos resultados de ensaio apresentados nas tabelas do item 3.3 foi realizado o tratamento estatístico. Fundamentalmente, três etapas foram desenvolvidas. A primeira etapa envolveu a análise dos resultados obtidos por espécie e por viga, estando incluídas nesta etapa as espécies Jatobá e Eucalipto Tereticornis. Em seguida, a análise envolveu os resultados obtidos por espécie para todas as vigas e, por último, foi desenvolvida análise envolvendo todas as espécies estudadas no presente trabalho.

De início, procedeu-se à análise traçando-se gráficos de dispersão, avaliando com isto a dependência entre o módulo de resistência à flexão e a umidade e entre o módulo de resistência à flexão e a densidade.

A seguir foram testados muitos modelos matemáticos para relacionar as variáveis, empregando-se as idéias de regressão múltipla. Entre os modelos estudados, foi escolhido o de melhor ajuste aos resultados experimentais, considerando-se os parâmetros estatísticos a serem oportunamente discutidos.

Uma parcela da análise estatística foi efetuada nos microcomputadores HP 9825 e EXATO-pro CCE disponíveis no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira, Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos. Por conveniência, a parcela remanescente da citada análise foi realizada no microcomputador PC-TX do Departamento de Matemática e Estatística da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queirós, Piracicaba, SP, ambas instituições da Universidade de São Paulo.

Nos itens subsequentes estão apresentadas algumas considerações a respeito dos conceitos estatísticos relacionados com a análise estatística efetuada.

3.4.1.1- Coeficiente de correlação (R^2)

Com base no diagrama de dispersão tem-se uma idéia do comportamento dos dados e podem ser testados, através da regressão múltipla, modelos aparentemente razoáveis. O coeficiente de correlação é uma indicação de quanto este modelo se ajusta aos dados, pois os pontos observados não estarão necessariamente sobre a curva de regressão.

O coeficiente de correlação estará sempre no intervalo $0 < R^2 \leq 1$ e quanto mais próximo de um, melhor o modelo pode ser admitido.

O coeficiente de correlação é considerado um parâmetro estatisticamente significativo para a análise de um modelo de regressão, mas deve ser analisado em conjunto com outros parâmetros também importantes.

3.4.1.2- Teste F

Indica a significância do modelo adotado, isto é, calcula o valor de F para a regressão, este valor será comparado com um valor tabelado, chamado valor crítico.

Se F (calculado) $>$ F (crítico) a regressão é considerada significativa estatisticamente.

3.4.1.3- Teste t

Determina a influência de cada uma das variáveis envolvidas no modelo.

De maneira análoga ao teste F , o valor de t calculado para a regressão deve ser comparado com um valor crítico tabelado, sempre associado a um nível α de significância.

Se $|t \text{ calculado}| > t \text{ (crítico)}$ é possível concluir que a variável considerada é significativa no modelo em estudo.

3.4.1.4- Exame dos resíduos

Os resíduos, definidos como a diferença entre os valores observados e os valores estimados, se constituem em parcelas não consideradas no modelo estatístico adotado.

Uma das maneiras mais expeditas de se estudar a distribuição dos resíduos é através de gráficos. O procedimento consiste em analisar o seu comportamento em relação às variáveis estudadas. Este estudo pode evidenciar discrepâncias de muitas naturezas e se os resíduos indicarem tendência sistemáticas deve-se suspeitar do modelo adotado.

Existem várias formas de apresentar graficamente os resíduos. Neste trabalho optou-se pelo diagrama de resíduos contra a variável dependente MRF. Quando estes diagramas apresentarem uma dispersão de pontos uniforme em torno da média, figura 3.2, todo o efeito da variável foi observado pelo modelo ou sua influência nos resultados observados não é significativa.

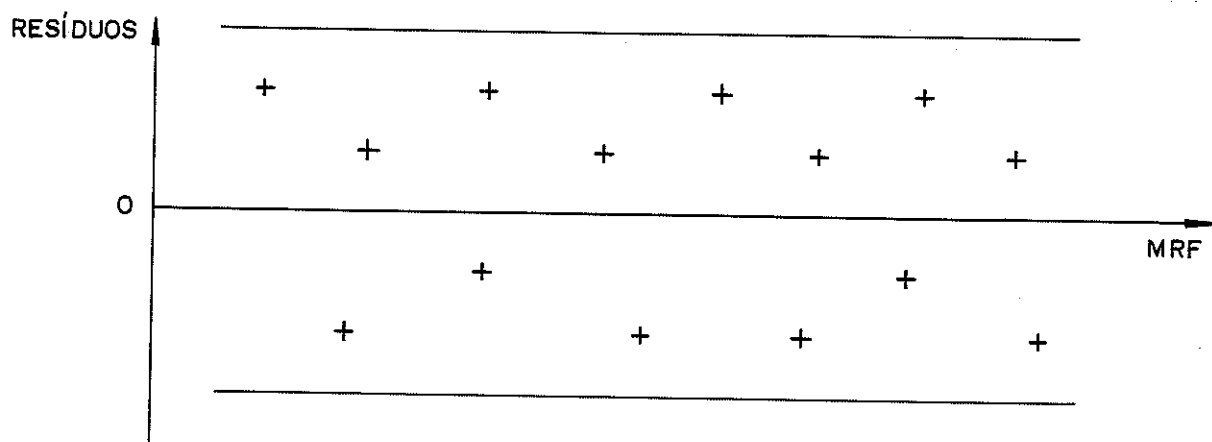


Fig. 3.2

Ocorrendo uma tendência de acréscimo ou decréscimo sucessivos de dispersão ao longo do eixo, figura 3.3, a variância não é uniforme, implicando provavelmente na necessidade da inclusão de pelo menos uma função quadrática.

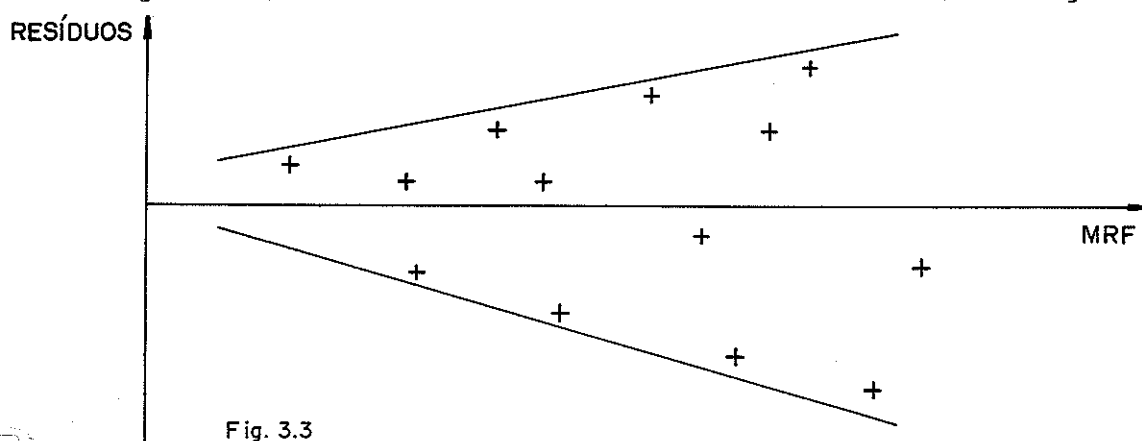


Fig. 3.3

Ocorrendo uma tendência linear, figura 3.4, provavelmente haja a necessidade da inclusão de um termo linear.

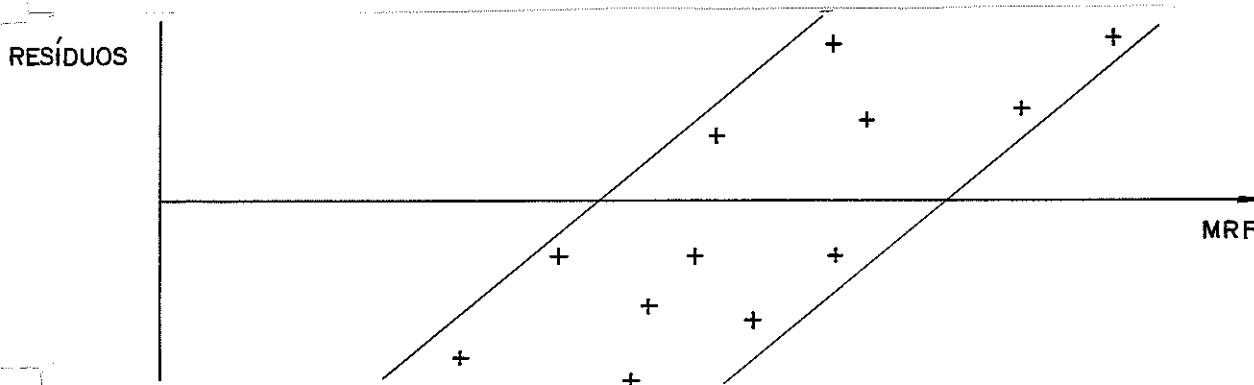


Fig. 3.4

Ocorrendo uma tendência curva, figura 3.5, é provável a necessidade da inclusão de termos lineares e quadráticos no modelo.

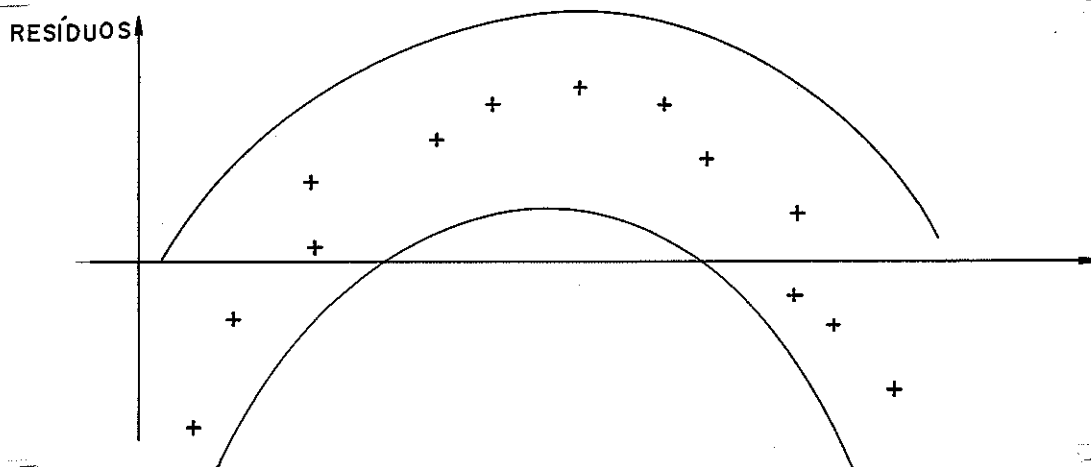


Fig. 3.5

3.4.2- Apresentação dos resultados obtidos da análise estatística

3.4.2.1- Espécie: Jatobá

Para o Jatobá, a apresentação dos resultados será feita, inicialmente, para cada viga de onde foram retirados corpos de prova para os ensaios de flexão. Em seguida, os resultados são juntados para todas as vigas. O intuito deste procedimento é mostrar o melhor ajuste dos modelos quando considerada amostra mais representativa da espécie.

Segundo recomendações de Hellmeister (11), para uma dada espécie não deve ser ensaiado material proveniente de menos de dez árvores. No caso do Jatobá, foi ensaiado material de onze vigas, adquiridas em épocas diferentes em três serrarias da cidade de São Carlos, procurando garantir plena aleatoriedade da amostra bem como a certeza da retirada de uma viga por árvore.

3.4.2.2.1- Regressão linear

Para cada uma das vigas adotou-se, após demorada manipulação de variáveis, o modelo estatístico com duas variáveis independentes para se efetuar a regressão múltipla.

$$\text{MRF} = \alpha + B_1U + B_2D$$

onde:

MRF = módulo resistência à flexão (MPa)

α , B_1 e B_2 = constantes

U = teor de umidade (%)

D = densidade (g/cm^3)

Os resultados da análise de regressão efetuada, por viga, para o Jatobá, estão apresentados nos itens 3.4.2.1.1.1. a 3.4.2.1.1.11, a seguir.

3.4.2.1.1.1- Viga 1

REGRESSION ANALYSIS

DEPENDENT VAR: MRFJ2

RANGE: 1 TO 10

OBS: 10

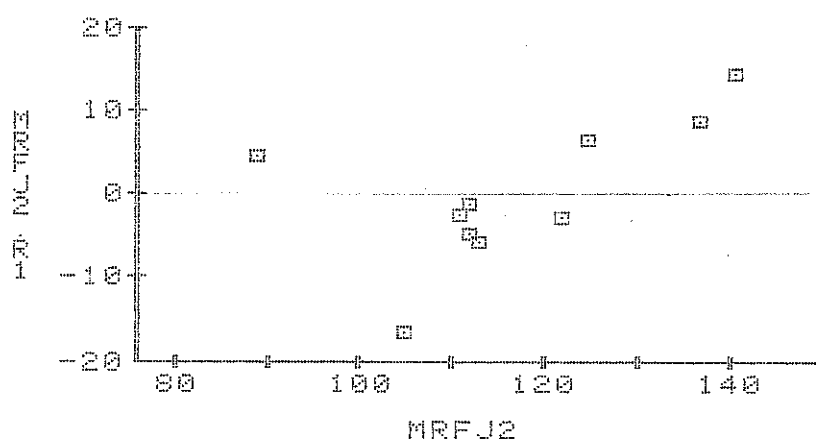
VARIABLE	COEFF	STD ERR	T-STAT
CONSTANT	75.046	103.777	.723
UJ2	-1.562	.660	-2.366
DJ2	78.246	125.339	.624

m3)B m3)

R-SQ: .671 CORR R-SQ: .577

F(2,7)= 7.150 DW: 1.433

Diagrama de Resíduos contra a Variável Dependente MRF



Modelo:

$$\text{MRF} = 75,046 - 1,562U + 78,246D$$

$R^2 = 0,671$ indicando adequação aceitável do modelo adotado.

Teste F:

Nível de significância $\alpha = 5\%$

F calculado = 7,15

F crítico = 4,74

F calculado > F crítico, indicando que o modelo é significativo.

Teste t:

Nível de significância $\alpha = 0,50$

t crítico = 0,711

Variável U: $|t| = 2,366$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é significativa no modelo

Variável D: $|t| = 0,624$

$|t| < t$ crítico, indicando que a variável não é significativa no modelo.

Resíduos:

Apresentam tendência para a linearidade

3.4.2.1.1.2- Viga 2

REGRESSION ANALYSIS

DEPENDENT VAR: MRFJ3

RANGE: 1 TO 11

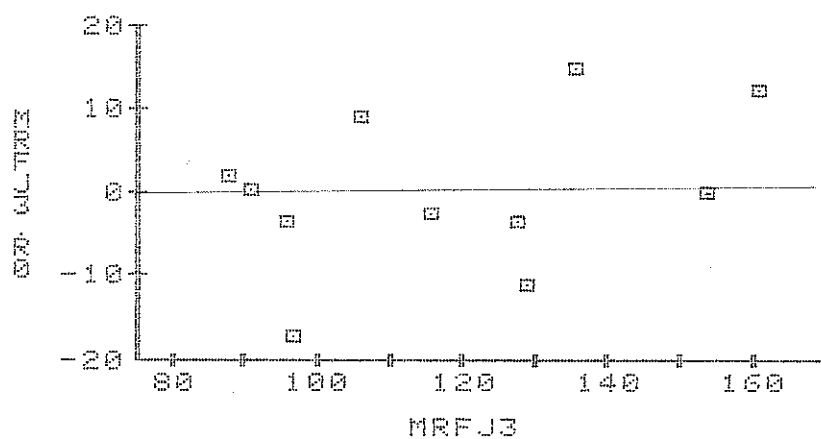
OBS: 11

VARIABLE	COEFF	STD ERR	T-STAT
CONSTANT	263.340	68.434	3.848
UJ3	-1.480	.513	-2.881
DJ3	-111.324	77.674	-1.433

m)G m)

R-SQ: .856 CORR R-SQ: .821
 F(2,8) = 23.937 DW: 1.250

Diagrama de Resíduos Contra a Variável Dependente MRF



Modelo:

$$\text{MRF} = 263,34 - 1,480U - 111,324D$$

$R^2 = 0,856$, indicando ótima adequação do modelo

Teste F:

Nível de significância $\alpha = 5\%$

F calculado = 23,937

F crítico = 4,46

F calculado > F crítico, indicando que o modelo é altamente significativo.

Teste t:

Nível de significância $\alpha = 0,50$

t crítico = 0,706

Variável U: $|t| = 2,881$

$|t| > t$ crítico indicando que a variável é significativa no modelo.

Variável D: $|t| = 1,433$

$|t| > t$ crítico indicando que a variável é significativa no modelo

Resíduos:

Apresentam dispersão uniforme de pontos em torno da média.

3.4.2.1.1.3- Viga 3

REGRESSION ANALYSIS

DEPENDENT VAR: MRFJ4

RANGE: 1 TO 9

OBS: 9

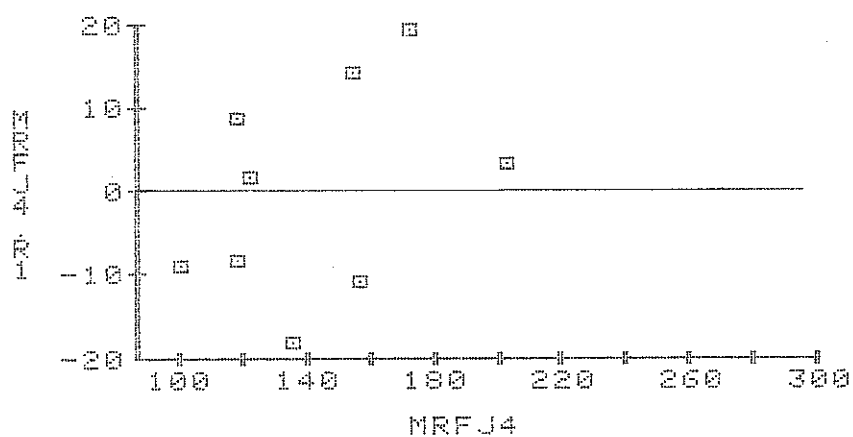
VARIABLE	COEFF	STD ERR	T-STAT
CONSTANT	-36.296	63.416	-.572
UJ4	-2.828	.515	-5.486
DJ4	244.516	75.111	3.255

m))G m))

R-SQ: .849 CORR R-SQ: .799

F(2,6)= 16.987 DW: 1.476

Diagrama de Resíduos contra a Variável Depedente MRF



Modelo:

$$\text{MRF} = 36,296 - 2,828U + 244,516D$$

$$R^2 = 0,849, \text{ indicando \u00f3tima adequa\u00e7\u00e3o do modelo}$$

Teste F:

N\u00edvel de signific\u00e2ncia $\alpha = 5\%$

F calculado = 16,987

F cr\u00edtico = 5,14

F calculado > F cr\u00edtico, indicando que o modelo \u00e9 altamente significativo.

Teste t:

N\u00edvel de signific\u00e2ncia $\alpha = 0,50$

t cr\u00edtico = 0,718

Vari\u00e1vel U: $|t| = 5,486$

$|t| > t$ cr\u00edtico indicando que a vari\u00e1vel \u00e9 altamente significativa no modelo.

Vari\u00e1vel D: $|t| = 3,255$

$|t| > t$ cr\u00edtico indicando que a vari\u00e1vel \u00e9 altamente significativa no modelo.

Res\u00edduos:

Apresentam dispers\u00e3o de pontos razoavelmente uniforme em torno da m\u00e9dia.

3.4.1.1.4- Viga 4

REGRESSION ANALYSIS

DEPENDENT VAR: MRFJ5

RANGE: 1 TO 15

OBS: 15

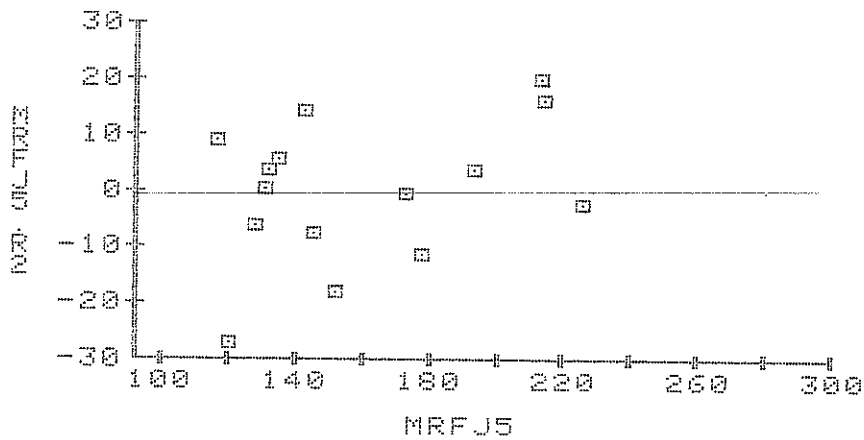
VARIABLE	COEFF	STD ERR	T-STAT
CONSTANT	70.905	73.783	.960
UJ5	-3.462	.529	-6.542
DJ5	160.874	85.097	1.890

m))G m))

R-SQ: .875 CORR R-SQ: .855

F(2,12)= 42.288 DW: 1.250

Diagrama de Resíduos Contra a Variável Dependente MRF



Modelo:

$$\text{MRF} = 70,905 - 3,462U + 160,874D$$

$R^2 = 0,875$, indicando ótima adequação do modelo

Teste F:

Nível de significância $\alpha = 5\%$

F calculado = 42,288

F crítico = 3,89

F calculado > F crítico, indicando que o modelo é altamente significativo.

Teste t:

Nível de significância $\alpha = 0,50$

t crítico = 0,695

Variável U: $|t| = 6,542$
 $|t| > t$ crítico, indicando que a variável é altamente significativa no modelo.

Variável D: $|t| = 1,890$
 $|t| > t$ crítico, indicando que a variável é significativa no modelo.

Resíduos:

Apresentam dispersão uniforme de pontos em torno da média.

3.4.2.1.1.5- Viga 5

REGRESSION ANALYSIS

DEPENDENT VAR: MRFJ6

RANGE: 1 TO 10

OBS: 10

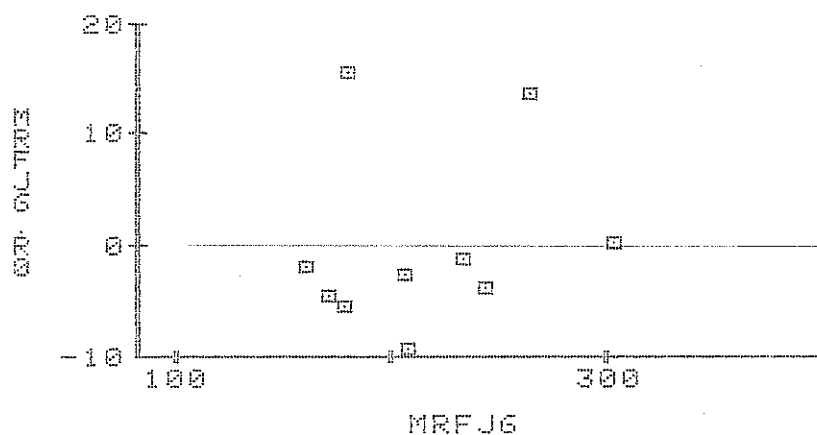
VARIABLE	COEFF	STD ERR	T-STAT
CONSTANT	-10.800	64.157	-.168
UJ6	-4.597	.341	-13.461
DJ6	281.693	63.734	4.419

m))B m))

R-SQ: .968 CORR R-SQ: .959

F(2,7)= 107.756 DW: 2.562

Diagrama de Resíduos Contra a Variável Dependente MRF



Modelo:

$$\text{MRF} = -10,80 - 4,597U + 281,693D$$

$$R^2 = 0,968, \text{ indicando \u00f3tima adequa\u00e7\u00e3o do modelo.}$$

Teste F:

N\u00edvel de signific\u00e2ncia $\alpha = 5\%$

F calculado = 107,756

F cr\u00edtico = 4,74

F calculado > F cr\u00edtico, indicando que o modelo \u00e9 altamente significativo.

Teste t:

N\u00edvel de signific\u00e2ncia $\alpha = 0,50$

t cr\u00edtico = 0,711

Vari\u00e1vel U: $|t| = 13,461$

$|t| > t$ cr\u00edtico, indicando que a vari\u00e1vel \u00e9 altamente significativa no modelo

Vari\u00e1vel D: $|t| = 4,419$

$|t| > t$ cr\u00edtico, indicando que a vari\u00e1vel \u00e9 altamente significativa no modelo.

Res\u00edduos:

Apresentam dispers\u00e3o de pontos razoavelmente uniforme em torno da m\u00e9dia.

3.4.2.1.1.6- Viga 6

REGRESSION ANALYSIS

DEPENDENT VAR: MRFJ7

RANGE: 1 TO 9

OBS: 9

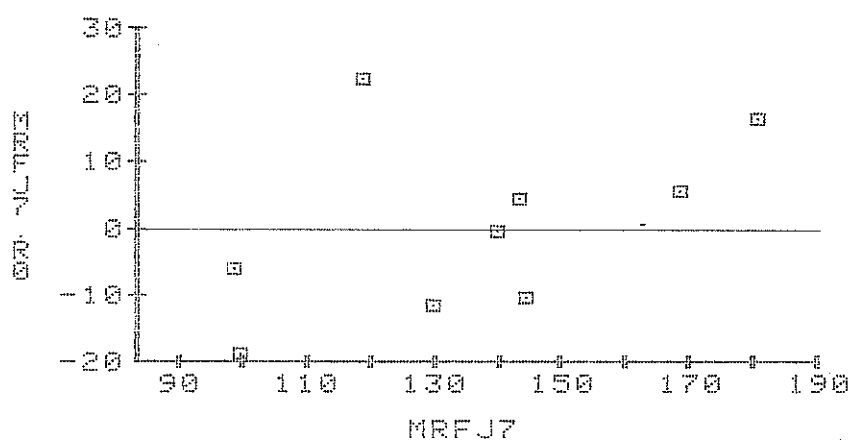
VARIABLE	COEFF	STD ERR	T-STAT
CONSTANT	274.893	143.684	1.913
UJ7	-.970	1.367	-.709
DJ7	-134.185	179.968	-.745

m))B m))

R-SQ: .770 CORR R-SQ: .693

F(2,6)= 10.064 DW: 2.775

Diagrama de Resíduos Contra a Variável Dependente MRF



Modelo:

$$\text{MRF} = 274,893 - 0,970U - 134,185D$$

$$R^2 = 0,770 \text{ indicando \u00f3tima adequa\u00e7\u00e3o do modelo}$$

Teste F:

N\u00edvel de signific\u00e2ncia $\alpha = 5\%$

F calculado = 10,064

F cr\u00edtico = 5,14

F calculado > F cr\u00edtico, indicando que o modelo \u00e9 significativo.

Teste T:

N\u00edvel de signific\u00e2ncia $\alpha = 0,50$

t cr\u00edtico = 0,718

Vari\u00e1vel U: $|t| = 0,709$

$|t| \cong t$ cr\u00edtico, indicando que a vari\u00e1vel pode ser considerada significativa no modelo.

Vari\u00e1vel D: $|t| = 0,745$

$|t| > t$ cr\u00edtico, indicando que a vari\u00e1vel \u00e9 significativa no modelo.

Res\u00edduos:

Apresentam dispers\u00e3o de pontos razoavelmente uniforme em torno da m\u00e9dia.

3.4.2.1.1.7- Viga 7

REGRESSION ANALYSIS

DEPENDENT VAR: MRFJ8

RANGE: 1 TO 11

OBS: 11

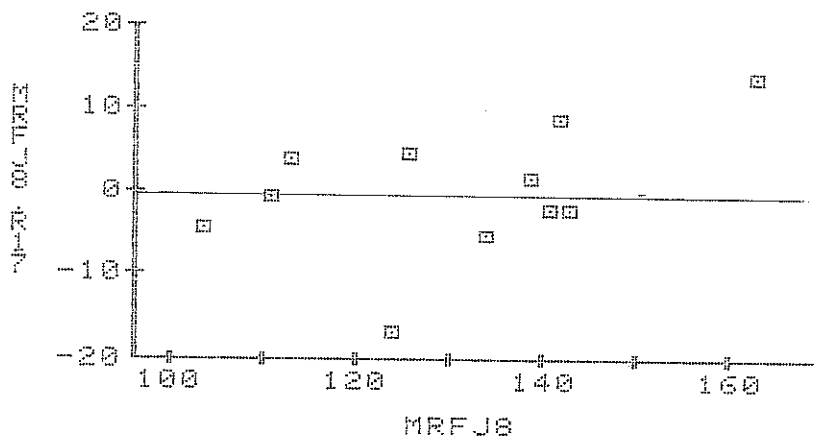
VARIABLE	COEFF	STD ERR	T-STAT
CONSTANT	369.593	140.446	2.631
UJ8	.635	1.397	.454
DJ8	-261.538	166.871	-1.567

m))B m))

R-SQ: .783 CORR R-SQ: .729

F(2,8)= 14.465 DW: 1.927

Diagrama de Resíduos Contra a Variável Dependente MRF



Modelo:

$$\text{MRF} = 369,593 + 0,635U - 261,538D$$

$$R^2 = 0,783, \text{ indicando \u00f3tima adequa\u00e7\u00e3o do modelo}$$

Teste F:

N\u00edvel de signific\u00e2ncia $\alpha = 5\%$

F calculado = 14,465

F cr\u00edtico = 4,46

F calculado > F cr\u00edtico indicando que o modelo \u00e9 altamente significativo

Teste t:

N\u00edvel de signific\u00e2ncia $\alpha = 0,50$

t cr\u00edtico = 0,706

Vari\u00e1vel U: $|t| = 0,454$

$|t| < t$ cr\u00edtico indicando que a vari\u00e1vel n\u00e3o \u00e9 significativa no modelo

Vari\u00e1vel D: $|t| = 1,567$

$|t| > t$ cr\u00edtico indicando que a vari\u00e1vel \u00e9 significativa no modelo.

Res\u00edduos:

Apresentam dispers\u00e3o de pontos razoavelmente uniforme em torno da m\u00e9dia.

3.4.2.1.1.8- Viga 8

REGRESSION ANALYSIS

DEPENDENT VAR: MRFJ9

RANGE: 1 TO 12

OBS:12

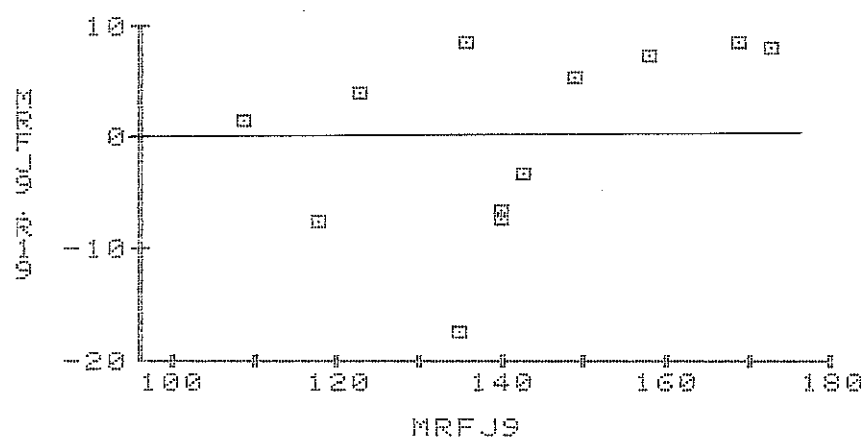
VARIABLE	COEFF	STD ERR	T-STAT
CONSTANT	248.653	63.727	3.901
UJ9	-.728	.704	-1.033
DJ9	-103.161	80.961	-1.274

m))B m))

R-SQ: .809 CORR R-SQ: .767

F(2,9)= 19.160 DW: 2.509

Diagrama de Resíduos Contra a Variável Dependente MRF



Modelo:

$$\text{MRF} = 248,635 - 0,728U - 103,161D$$

$R^2 = 0,809$, indicando ótima adequação do modelo.

Teste F:

Nível de significância $\alpha = 5\%$

F calculado 19,160

F crítico = 4,26

F calculado > F crítico, indicando que o modelo é altamente significativo.

Teste t:

Nível de significância $\alpha = 0,50$

t crítico = 0,703

Variável U: $|t| = 1,274$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é significativa no modelo.

Variável D: $|t| = 1,274$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é significativa no modelo

Resíduos:

Apresentam dispersão de pontos razoavelmente uniforme em torno da média.

3.4.2.1.1.9- Viga 9

REGRESSION ANALYSIS

DEPENDENT VAR: MRFJ10

RANGE: 1 TO 9

OBS: 9

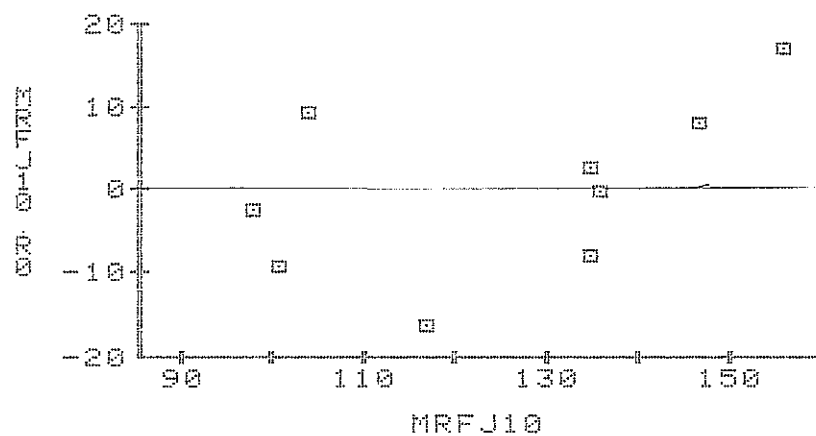
VARIABLE	COEFF	STD ERR	T-STAT
CONSTANT	270.497	215.804	1.253
UJ10	-.702	1.637	-.428
DJ10	-155.078	275.965	-.561

m3)B m3)

R-SQ: .754 CORR R-SQ: .673

F(2,6)= 9.234 DW: 2.372

Diagrama de Resíduos Contra a Variável Dependente MRF



Modelo:

$$\text{MRF} = 270,497 - 0,702U - 155,078D$$

$$R^2 = 0,754, \text{ indicando } \acute{o}\text{tima adequa\c{c}\~{a}\~{o} do modelo}$$

Teste F:

Nível de significância $\alpha = 5\%$

F calculado = 9,234

F crítico = 5,14

F calculado > F crítico, indicando que o modelo é significante.

Teste t:

Nível de significância $\alpha = 0,50$

t crítico = 0,718

Variável U: $|t| = 0,428$

$|t| < \text{crítico}$, indicando que a variável não é
significante no modelo.

Variável D: $|t| = 0,561$

$|t| < t \text{ crítico}$, indicando que a variável não
é significativa no modelo.

Resíduos:

Apresentam dispersão de pontos razoavelmente uniforme em
torno da média.

3.4.2.1.1.10- Viga 10

REGRESSION ANALYSIS

DEPENDENT VAR: MRFJ11

RANGE: 1 TO 9

OBS: 9

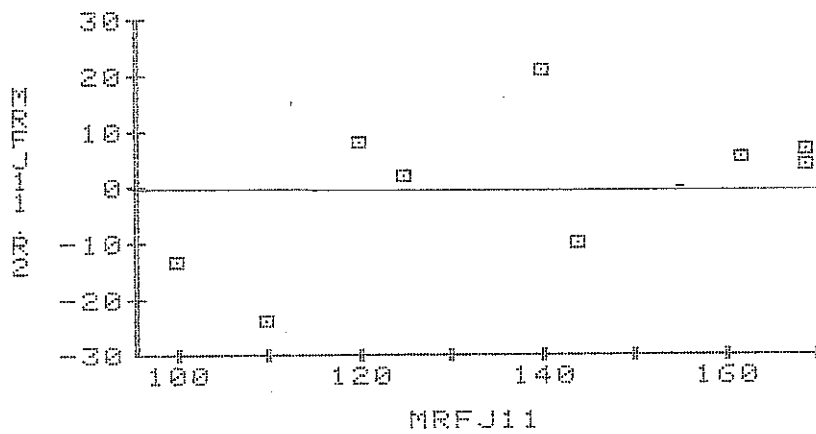
VARIABLE	COEFF	STD ERR	T-STAT
CONSTANT	137.503	229.815	.598
UJ11	-1.804	1.321	-1.365
DJ11	34.350	235.121	.146

m))G m))

R-SQ: .724 CORR R-SQ: .633

F(2,6)= 7.907 DW: 2.834

Diagrama de Resíduos Contra a Variável Dependente MRF



Modelo:

$$\text{MRF} = 137,503 - 1,804U + 34,350D$$

$R^2 = 0,724$, indicando ótima adequação do modelo.

Teste F:

Nível de significância $\alpha = 5\%$

F calculado = 7,907

F crítico = 5,14

F calculado > F crítico, indicando que o modelo é significante.

Teste t:

Nível de significância $\alpha = 0,50$

t crítico = 0,718

Variável U: $|t| = 1,365$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é
significante no modelo.

Variável D: $|t| = 0,146$

$|t| < t$ crítico, indicando que a variável não
é significativa no modelo.

Resíduos:

Apresentam dispersão de pontos razoavelmente uniforme em torno da média.

3.4.2.1.1.11- Viga 11

REGRESSION ANALYSIS

DEPENDENT VAR: MRFJ12

RANGE: 1 TO 12

OBS: 12

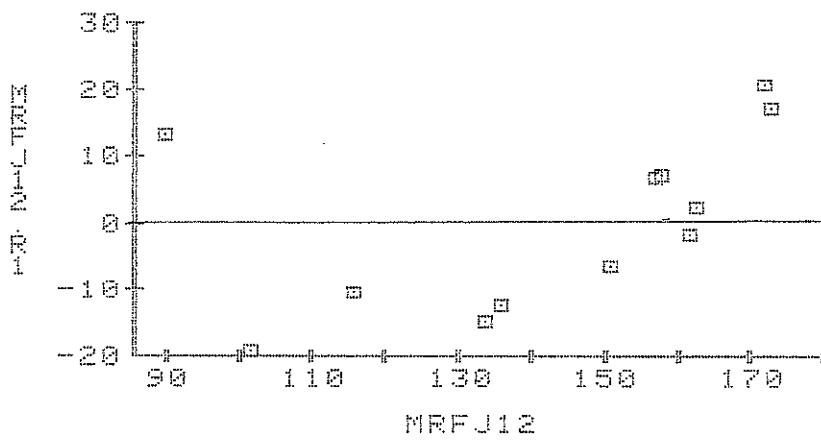
VARIABLE	COEFF	STD ERR	T-STAT
CONSTANT	90.190	62.322	1.447
UJ12	-2.325	.515	-4.512
DJ12	98.510	76.005	1.296

m))G m))

R-SQ: .774 CORR R-SQ: .723

F(2,9)= 15.417 DW: 2.878

Diagrama de Resíduos Contra Variável Dependente MRF



Modelo:

$$\text{MRF} = 90,190 - 2,325U + 98,510D$$

$R^2 = 0,774$, indicando ótima adequação do modelo.

Teste F:

Nível de significância $\alpha = 5\%$

F calculado = 15,714

F crítico = 4,26

F calculado > F crítico, indicando que o modelo é altamente significativo.

Teste t:

Nível de significância $\alpha = 0,50$

t crítico = 0,703

Variável U: $|t| = 4,512$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é altamente significativa no modelo.

Variável D: $|t| = 1,296$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é significativa no modelo.

Resíduos:

Apresentam tendência linear.

3.4.2.1.1.12- Alguns comentários

Como pode ser observado nos itens anteriores, o modelo matemático interessante para a análise de regressão por vigas envolveu apenas as variáveis umidade e densidade, suficientes para abranger a variabilidade das propriedades do material apenas ao longo de uma peça. Entretanto, para diversas vigas, os níveis de significância não se afiguram satisfatórios, evidenciando, possivelmente, amostra não aleatorizada ou, no mínimo, não suficientemente abrangente.

Outra observação cabível se refere ao fato de a umidade e a densidade estarem estreitamente relacionadas (o conhecido diagrama de Kollmann evidencia tal fato). Por esta razão poderia se esperar, em um modelo matemático mais amplo, representando todo o material das onze vigas ensaiadas, a influência significativa de outras variáveis, tais como UD ou análogas.

Além disto, há o interesse em se globalizar os resultados para as onze vigas de Jatobá, de diversas procedências, com o intuito de avaliar, para essa espécie, a influência efetiva da umidade e da densidade no módulo de resistência à flexão estática.

3.4.2.1.2- Resultado da análise de regressão conjunta-onze vigas de Jatobá

Pelas razões explicadas no item anterior, foi efetuada análise de regressão englobando os resultados dos corpos de prova de Jatobá obtidos a partir das onze vigas consideradas.

Após demorada e minuciosa manipulação de variáveis, do estudo de dezenas de modelos, adotou-se aquele que, pelos parâmetros estatísticos avaliados, mostrou melhor ajuste aos resultados experimentais.

O modelo referido é o seguinte:

$$\text{MRF} = \alpha + \beta_1 U + \beta_2 D + \beta_3 UD + \beta_4 U^2 D + \beta_5 UD^2$$

onde:

MRF = módulo de resistência à flexão (MPa)

$\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ = constantes

U = teor de umidade (%)

D = densidade (g/cm³)

Resumo da Análise:

Titulo.....:ANALISE DE REGRESSAO PARA A ESPECIE JATOPA
 Projeto.....:TESE DE MESTRADO
 Experimento.....:EXF1
 Data da execucao...:JUNHO/85 A SETEMBRO/85
 Arquivo gerado em:13/10/84
 Responsavel.....:RAGUEL GONDALVES TANARI
 Data.....:04/01/1984
 Arquivo.....:R1JATOPA1

Relacao de Variaveis	Valor Maximo	Valor Minimo	Media	Desvio
A=U	50.5000000	0.0000000	17.3153046	12.0126486
B=D	1.59000000	0.79000000	0.95299145	0.10001090
C=UD	53.5300000	0.0000000	17.3445128	13.2388095
D=U^2D	2703.26500	0.0000000	497.074778	536.073338
E=UD^2	58.4820200	0.0000000	17.5269092	14.6653071
RAF	305.000000	88.000000	143.333333	37.3983688

Variavel Dependente.....:MRP
 Numero de Observacoes.....: 117
 Observacoes Perdidas.....: 0

D : D
 D : D
 UD : UD
 U^2D : U^2UD
 UD^2 : UD^2
 RAF : RAF

Desvio Padrao Residual.....: 22.99214683381301
 Coeficiente de Determinacao...: .6363247
 Graus de Liberdade do Residual: 111
 Quadrado Medio do Residual....: 529.4330160276174
 Valor de F.....: 39.18103
 Nivel de Significancia de F...: 2.872047E-05

Variavel	Est.Param.	Erro Padrao	t	P(>t)	Lim.Inf.	Lim.Sup.
Constante	-102.110227					
D	21.2557730	17.7308030	1.1983	23.337	-13.8931498	56.4046957
D	538.868501	59.1041907	9.1114	0.0000	217.794747	452.338255
UD	-48.9829569	33.4748401	-1.4728	17.266	-112.261979	20.3761057
U^2D	0.07141638	0.01751638	4.0771	0.0000	0.03670621	0.10612439
UD^2	10.3962635	15.5006438	0.6689	53.778	-12.3158098	49.1123489

Cálculo de Resíduos

SISTEM (ESTIMA) Centro de Informatica na Agricultura - CIAGRI/USP Pag. 1

Arquivo:.....A:JATOBA1

Variavel	Identificacao da Variavel	Estim.Param
Const.		-102.110223
U	U	21.2557730
D	D	335.066501
UD	U+D	-45.9529369
U*2D	U+U*D	0.07141630
UD*2	D+U*D	18.3982685
RRF	RRF	

Durbin-Watson : .7138503

Coef. Ro..... : .6436707

-----ORDER ORIGINAL DE ENTRADA-----

-----ORDENADO EM e/s-----

Obs.	Y.Observado	Y.Estimado	Residuo	Obs.	Y.Observado	e/s
1	105.0000000	134.8765560	29.8765560	48	245.0000000	-2.455
2	122.0000000	141.6360410	19.6360410	52	181.0000000	-2.246
3	112.0000000	118.0762410	-6.0762410	44	214.0000000	-2.004
4	111.0000000	119.0744320	8.0744320	46	203.0000000	-1.987
5	137.0000000	150.0749450	13.0749450	54	235.0000000	-1.950
6	125.0000000	129.4597930	4.4597930	45	215.0000000	-1.861
7	141.0000000	146.3823550	5.3823550	53	245.0000000	-1.787
8	113.0000000	129.6372990	16.6372990	50	190.0000000	-1.681
9	89.0000000	94.3533170	5.3533170	49	209.0000000	-1.678
10	112.0000000	125.3574600	13.3574600	47	172.0000000	-1.501
11	161.0000000	140.7730710	-20.2269287	55	162.0000000	-1.401
12	136.0000000	146.4958500	10.4958500	51	305.0000000	-1.535
13	95.0000000	115.7751690	19.7751690	57	194.0000000	-1.379
14	88.0000000	98.8932800	10.8932800	38	143.0000000	-1.279
15	97.0000000	115.3544510	18.3544510	42	174.0000000	-1.249
16	129.0000000	168.8335270	39.8335270	109	172.0000000	-1.238
17	154.0000000	153.1067950	-0.8932037	85	169.0000000	-1.223
18	116.0000000	135.8141020	19.8141020	36	133.0000000	-1.812
19	106.0000000	119.3472140	13.3472137	112	173.0000000	-0.935
20	91.0000000	108.5097750	17.5097751	40	135.0000000	-0.923
21	128.0000000	144.1376650	16.1376648	11	161.0000000	-0.880
22	119.0000000	117.0290990	-1.9709015	77	136.0000000	-0.878
23	136.0000000	159.1704410	23.1704407	34	146.0000000	-0.840
24	204.0000000	222.9842970	18.9842969	59	144.0000000	-0.823
25	123.0000000	106.2276840	-16.7723160	80	149.0000000	-0.816
26	119.0000000	109.8841020	-9.1158981	39	117.0000000	-0.750
27	157.0000000	170.9284050	13.9284050	25	123.0000000	-0.727
28	101.0000000	108.7217790	7.7217789	62	181.0000000	-0.725
29	135.0000000	144.3993530	9.3993530	32	129.0000000	-0.716
30	173.0000000	157.5354000	-15.4645996	41	132.0000000	-0.689
31	178.0000000	163.3126370	-14.6873627	95	156.0000000	-0.680
32	129.0000000	112.5448610	-16.4551392	30	173.0000000	-0.673
33	121.0000000	122.5342100	1.5342102	110	157.0000000	-0.640
34	146.0000000	126.6766050	-19.3233948	31	178.0000000	-0.639
35	226.0000000	226.2549590	0.2549591	114	158.0000000	-0.595
36	133.0000000	109.7416230	-23.2583771	57	119.0000000	-0.565
37	194.0000000	162.2947000	-31.7052917	82	143.0000000	-0.532
38	143.0000000	113.5873570	-29.4126434	29	155.0000000	-0.461
39	117.0000000	99.5614470	-17.4385529	43	153.0000000	-0.399
40	135.0000000	113.7680290	-21.2319707	26	119.0000000	-0.396
41	132.0000000	116.1597140	-15.8402857	87	158.0000000	-0.314
42	174.0000000	145.2826390	-28.7173615	86	140.0000000	-0.216
43	153.0000000	143.8364260	-9.1635742	91	104.0000000	-0.191
44	214.0000000	167.9308620	-46.0691380	53	130.0000000	-0.171
45	215.0000000	172.2023620	-42.7976380	83	173.0000000	-0.161

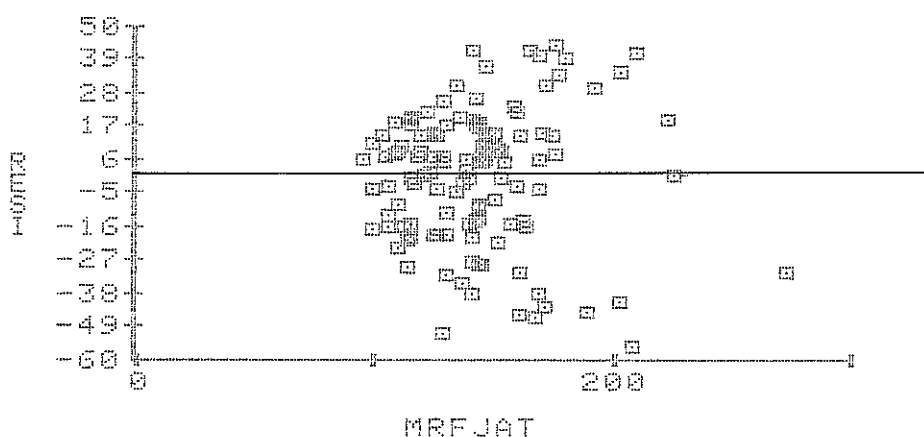
SISREG IESTIMA1 Centro de Informatica na Agricultura - DIAGRI/UEP Pag. 2

46	208.0000000	142.3210140	-45.6789860	113	163.0000000	-0.134
47	172.0000000	137.4821620	-34.5178380	78	109.0000000	-0.136
48	285.0000000	208.5398160	-56.4401840	97	140.0000000	-0.112
49	209.0000000	170.4301150	-38.5498850	22	119.0000000	-0.086
50	120.0000000	141.3427280	-38.6672720	17	154.0000000	-0.039
51	305.0000000	273.1842500	-31.8357500	115	116.0000000	-0.030
52	181.0000000	129.3393140	-51.6406860	60	140.0000000	-0.017
53	245.0000000	203.9116970	-41.0883030	35	226.0000000	0.011
54	235.0000000	190.1538390	-44.8461610	102	120.0000000	0.027
55	142.0000000	129.7986300	-32.2013700	33	121.0000000	0.067
56	130.0000000	126.0681480	-3.9368520	98	136.0000000	0.085
57	119.0000000	103.9986190	-13.0013809	111	136.0000000	0.102
58	99.0000000	116.3215260	17.3215260	116	151.0000000	0.190
59	144.0000000	123.0844500	-18.9155502	6	125.0000000	0.194
60	140.0000000	139.5981750	-0.4018250	84	140.0000000	0.211
61	100.0000000	121.6801070	21.6801070	7	141.0000000	0.234
62	131.0000000	144.3278960	16.6721039	106	134.0000000	0.235
63	169.0000000	175.9949450	6.9949450	9	89.0000000	0.255
64	145.0000000	152.8072970	7.8072968	74	163.0000000	0.256
65	134.0000000	177.2963100	43.2963100	3	112.0000000	0.264
66	126.0000000	143.7876130	17.7876129	79	123.0000000	0.279
67	104.0000000	129.0514530	25.0514526	96	96.0000000	0.284
68	111.0000000	125.0854110	14.0854111	81	110.0000000	0.294
69	124.0000000	145.8354030	41.8354030	63	169.0000000	0.304
70	139.0000000	160.1322630	21.1322632	28	101.0000000	0.336
71	113.0000000	124.2209930	13.2209930	64	145.0000000	0.340
72	141.0000000	180.0508080	39.0508080	108	102.0000000	0.351
73	142.0000000	172.1383360	30.1383362	4	111.0000000	0.351
74	163.0000000	168.8811950	5.8811951	75	143.0000000	0.404
75	143.0000000	152.2885910	9.2885906	76	135.0000000	0.432
76	135.0000000	144.9416660	9.9416656	93	101.0000000	0.444
77	136.0000000	115.8051830	-20.1948166	12	136.0000000	0.456
78	109.0000000	104.0160600	-2.9839401	14	82.0000000	0.474
79	123.0000000	129.4035190	6.4035187	94	135.0000000	0.522
80	149.0000000	130.2426450	-18.7573547	5	137.0000000	0.568
81	118.0000000	124.7532580	6.7532578	71	113.0000000	0.575
82	143.0000000	130.7567440	-12.2432556	19	106.0000000	0.581
83	173.0000000	169.2936400	-3.7063599	10	112.0000000	0.581
84	140.0000000	144.8614650	4.8614655	117	162.0000000	0.587
85	149.0000000	140.8821560	-38.1178436	107	90.0000000	0.593
86	140.0000000	135.0264740	-4.9735260	89	147.0000000	0.602
87	158.0000000	150.7901150	-7.2098846	27	157.0000000	0.606
88	136.0000000	137.9540250	1.9540253	68	111.0000000	0.613
89	147.0000000	160.8506320	13.8506317	90	135.0000000	0.638
90	135.0000000	149.6661380	14.6661377	21	128.0000000	0.702
91	104.0000000	99.6106950	-4.3893051	8	113.0000000	0.724
92	117.0000000	142.6701350	25.6701355	101	125.0000000	0.744
93	101.0000000	111.2163390	10.2163391	58	99.0000000	0.753
94	135.0000000	147.0100250	12.0100250	20	91.0000000	0.765
95	158.0000000	140.3655850	-15.6344152	66	126.0000000	0.774
96	98.0000000	104.5217510	6.5217514	15	97.0000000	0.867
97	140.0000000	137.4343850	-2.5656149	24	204.0000000	0.822
98	110.0000000	146.3173370	36.3173370	2	122.0000000	0.828
99	162.0000000	191.5968020	29.5968018	13	96.0000000	0.868
100	100.0000000	141.2801970	41.2801970	18	116.0000000	0.862
101	125.0000000	142.1062930	17.1062927	70	139.0000000	0.919
102	120.0000000	120.6102400	0.6102400	61	100.0000000	0.943
103	144.0000000	177.5967100	33.5967100	23	136.0000000	1.008

SISRES (ESTIMAT) Centro de Informatica na Agricultura - CIAGRI/USP Pag. 3

104	189.0000000	203.3514560	34.3514560	67	104.0000000	1.090
105	189.0000000	210.0517120	41.0517120	92	117.0000000	1.116
106	134.0000000	139.4103850	5.4103851	99	162.0000000	1.287
107	90.0000000	103.6240770	13.6240768	1	105.0000000	1.299
108	102.0000000	110.0664980	8.0664979	73	142.0000000	1.311
109	172.0000000	143.5320180	-28.4679871	103	144.0000000	1.461
110	157.0000000	142.2745210	-14.7254791	104	169.0000000	1.494
111	136.0000000	138.3557740	2.3557739	98	110.0000000	1.580
112	173.0000000	151.5570680	-21.4429321	72	141.0000000	1.698
113	163.0000000	159.9283290	-6.0716705	16	129.0000000	1.732
114	158.0000000	144.3138580	-13.6861420	105	169.0000000	1.785
115	116.0000000	113.2050460	-0.6949539	100	100.0000000	1.795
116	151.0000000	155.3739780	4.3739777	69	124.0000000	1.820
117	162.0000000	175.4962620	13.4962616	83	134.0000000	1.883

Diagrama de Resíduos Contra a Variável Dependente MRF



Modelo:

$$MRF = -102,11 + 21,26U + 335,07D - 45,95UD + 0,071U^2D + 18,40D^2$$

$R^2 = 0,64$, indicando adequação satisfatória do modelo

Teste F:

Nível de significância $\alpha = 5\%$

F calculado: 39,181

F crítico: 2,37

F calculado > F crítico, indicando que o modelo é altamente significativo.

Teste t:

Nível de significância $\alpha = 0,25$

t crítico = 1,1616

Variável U: $|t| = 1,1983$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é significativa no modelo.

Variável D: $|t| = 5,6614$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é altamente significativa no modelo.

Variável UD: $|t| = 1,3728$

$|t| > t$ crítico indicando que a variável é significativa no modelo.

Variável U²D: $|t| = 4,0771$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é altamente significativa no modelo.

Variável UD²: $|t| = 1,1869$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é significativa no modelo.

Resíduos:

Apresentam dispersão de pontos em torno da média.

3.4.2.2- Espécie Eucalipto Tereticornis

Analogamente ao Jatobá, a apresentação dos resultados será feita, de início, para cada viga de onde foram retirados corpos de prova para os ensaios de flexão. Em seguida, os resultados são reunidos para as vigas.

Para o Eucalipto Tereticornis foram retirados corpos de prova de apenas duas vigas. O intuito deste procedimento é a obtenção de subsídios para evidenciar a validade da recomendação de Hellmeister, conforme citado em 3.4.2.1. Com corpos de prova retirados de apenas duas vigas não é possível atingir a conclusão satisfatória para a espécie, conforme será visto adiante.

3.4.2.2.1- Regressão linear por viga

Para cada uma das vigas, adotou-se, após demorada manipulação de variáveis, o modelo estatístico com duas variáveis independentes para se efetuar a regressão:

$$\text{MRF} = \alpha + \beta_1 U + \beta_2 D$$

onde: MRF = módulo de resistência à flexão (MPa)

U = teor de umidade (%)

D = Densidade (g/cm³)

Os resultados da análise de regressão efetuada, por viga, para o Eucalipto Tereticornis, estão apresentados nos itens 3.4.2.2.1.1 a 3.4.2.2.1.2 a seguir.

3.4.2.2.1.1- Viga 1

REGRESSION ANALYSIS

DEPENDENT VAR: MRFEU13

RANGE: 1 TO 14

OBS:14

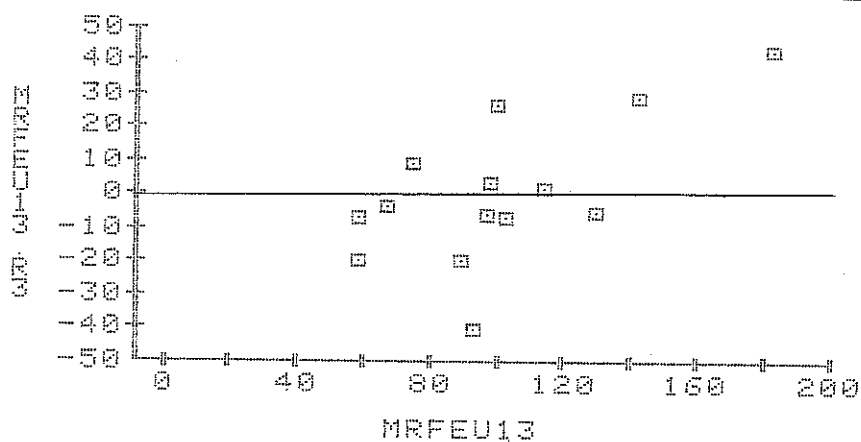
VARIABLE	COEFF	STD ERR	T-STAT
CONSTANT	-297.251	225.929	-1.315
UEU13	-3.011	.752	-4.004
DEU13	472.520	242.799	1.946

m))G m))

R-SQ: .593 CORR R-SQ: .519

F(2,11)= 8.025 DW: 2.169

Diagrama de Resíduos Contra a Variável Dependente MRF



Modelo:

$$\text{MRF} = -297,251 - 3,011U + 472,520D$$

$R^2 = 0,59$, indicando adequação razoável do modelo.

Teste F:

Nível de significância $\alpha = 5\%$

F calculado = 8,025

F crítico = 3,98

F calculado > F crítico, indicando que o modelo é significativo.

Teste t:

Nível de significância $\alpha = 0,25$

t crítico = 1,215

Variável U: $|t| = 4,004$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é altamente significativa no modelo.

Variável D: $|t| = 1,946$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é altamente significativa no modelo.

Resíduos:

Apresentam dispersão de pontos uniforme em torno da média se desconsiderados dois de seus pontos.

3.4.2.2.1.2- Vigã 2

REGRESSION ANALYSIS

DEPENDENT VAR: MRFEU14

RANGE: 1 TO 15

OBS:15

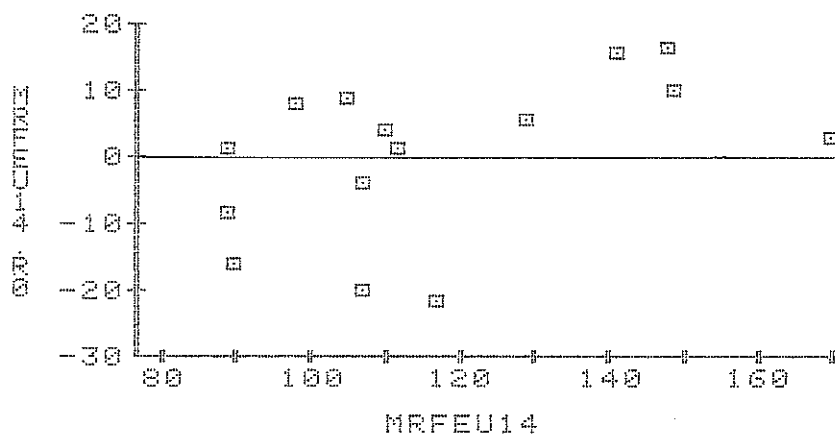
VARIABLE	COEFF	STD ERR	T-STAT
CONSTANT	304.550	71.187	4.278
UEU14	-2.393	.388	-6.160
DEU14	-155.117	72.019	-2.153

m))@ m))

R-SQ: .766 CORR R-SQ: .727

F(2,12)= 19.718 DW: 2.955

Diagrama de Resíduos Contra a Variável Dependente MRF



Modelo:

$$\text{MRF} = 304,550 - 2,393U - 155,117D$$

$R^2 = 0,77$, indicando ótima adequação do modelo.

Teste F:

Nível de significância $\alpha = 5\%$

F calculado = 19,718

F crítico = 3,89

F calculado > F crítico, indicando que o modelo é altamente significativo.

Teste t:

Nível de significância $\alpha = 0,25$

t crítico = 1,209

Variável U: $|t| = 6,160$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é altamente significativa no modelo.

Variável D: $|t| = 2,153$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é altamente significativa no modelo.

Resíduos:

Apresentam dispersão de pontos razoavelmente em torno da média.

3.4.2.2.2- Resultado da análise de regressão conjunta-
duas vigas de Eucaplito Tereticornis

Pelas razões já explicadas anteriormente, foi realizada análise de regressão englobando os resultados dos corpos de prova de Eucaplito Tereticornis obtidos a partir das duas vigas consideradas.

Após cuidadosa manipulação de variáveis, do estudo de muitos modelos, foi adotado aquele que, pelos parâmetros estatísticos avaliados, mostrou-se de ajuste mais satisfatórios aos resultados experimentais.

O modelo referido é o seguinte:

$$\text{MRF} = \alpha + \beta_1 U + \beta_2 UD + \beta_3 U^2 D + \beta_4 UD^2 + \beta_5 U^2 D^2$$

onde: MRF = módulo de resistência à flexão (MPa)

$\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ = constantes

U = teor de umidade (%)

D = densidade (g/cm³)

Resumo da análise:

SISREG (REGM) Centro De Informatica Na Agricultura - CIAGRI/USP Pag. 1

Titulo.....:ANALISE DE REGRESSAO PARA ESPECIE EUCALIPTO
 Projeto.....:DISSERTACAO DE MESTRADO
 Experimento.....:ENSAIO DE FLEXAO ESTATICA
 Data da medicao...:1985
 Arquivo gerado em:24/09/86
 Responsavel.....:RAGUEL BONCALVES TANAAAMI
 Data.....:02/09/1985
 Arquivo.....:A1EUC4

Relacao de Variaveis	Valor Maximo	Valor Minimo	Media	Desvio
A=UEU	31.6000000	1.0000000	15.7700000	9.47956605
B=UEUDEU	30.6520000	0.8700000	15.1953333	9.00770234
C=U ² DEU	966.603200	0.8700000	322.043493	305.258039
D=UD ² EU	29.7324400	0.7569000	14.6578567	8.58741459
E=U ² D ²	939.545104	0.7569000	309.332233	289.776170
MRFEU	183.000000	59.000000	109.066667	29.7740993

Variavel Dependente.....:MRFEU
 Numero de Observacoes.....:30
 Observacoes Perdidas.....:0

UEU : UEU
 UEUDEU : UEUDEU
 U²DEU : U²DEU
 UD²EU : UD²EU
 U²D² : U²D²
 MRFEU : MRFEU

Desvio Padrao Residual.....: 22.04904525199353
 Coeficiente de Determinacao..: .5462076
 Graus de Liberdade do Residuo: 24
 Quadrado medio do Residuo....: 486.1603965244585
 Valor de F.....: 5.777524
 Nivel de Significancia de F.: .1226604

Variavel	Est.Param.	Erro Padrao	t	P(>t)	Lim.Inf.	Lim.Sup.
Constante	143.449231					
UEU	-480.739552	301.842122	-1.5927	12.432	-1103.68826	142.209157
UEUDEU	933.021570	605.113253	1.5419	13.618	-315.825070	2181.86821
U ² DEU	3.00216129	1.52251855	1.9719	6.0260	-0.14004750	6.14437007
UD ² EU	-451.557770	303.524303	-1.4877	14.985	-1077.97820	174.862663
U ² D ²	-3.16419176	1.57297079	-2.0116	5.5620	-6.41052504	0.08214151

Cálculo dos Resíduos

SISREG [ESTIMA] Centro de Informatica na Agricultura - CIAGRI/USP Pag. 1

Arquivo.....:AIEUC4

Variável	Identificação da Variável	Estim.Param
Const. :		143.449231
UEU :	UEU	-480.739532
UEUDEU :	UEUDEU	933.021570
U^2DEU :	U^2DEU	3.00216129
UD^2EU :	UD^2EU	-451.537770
U^2D^2 :	U^2D^2	-3.16419174

-----ORDEM ORIGINAL DE ENTRADA-----

---ORDENADO EM e/s---

Obs.	Y.Observado	Y.Estimado	Residuo	Obs.	Y.Observado	e/s
1	68.0000000	83.3128200	15.3128204	13	183.0000000	-2.122
2	59.0000000	90.2648850	31.2648849	20	170.0000000	-1.384
3	90.0000000	111.2156300	21.2156296	24	149.0000000	-1.164
4	59.0000000	60.1433070	1.1433067	11	143.0000000	-1.064
5	115.0000000	128.9524540	13.9524536	23	105.0000000	-0.907
6	103.0000000	107.1514820	4.1514816	8	100.0000000	-0.687
7	94.0000000	133.6526490	39.6526490	29	148.0000000	-0.352
8	100.0000000	84.8550030	-15.1449966	30	98.0000000	-0.344
9	75.0000000	90.1159590	15.1159592	27	110.0000000	-0.325
10	130.0000000	130.2255860	0.2255859	12	98.0000000	-0.369
11	143.0000000	119.5310750	-23.4689255	25	89.0000000	-0.341
12	98.0000000	89.8617630	-8.1382370	17	141.0000000	-0.216
13	183.0000000	136.2042690	-46.7957310	15	89.0000000	-0.149
14	99.0000000	100.5662000	1.5662003	22	107.0000000	-0.062
15	89.0000000	85.7152710	-3.2847290	10	130.0000000	0.010
16	90.0000000	97.7657240	7.7657242	4	59.0000000	0.052
17	141.0000000	136.2306980	-4.7693024	14	99.0000000	0.071
18	95.0000000	123.7220230	28.7220230	26	112.0000000	0.081
19	107.0000000	137.8743900	30.8743896	6	103.0000000	0.188
20	170.0000000	132.8712620	-37.1287380	21	129.0000000	0.211
21	129.0000000	133.6455380	4.6455383	16	90.0000000	0.352
22	107.0000000	105.6316990	-1.3683014	28	117.0000000	0.526
23	105.0000000	85.0116500	-19.9883499	5	115.0000000	0.633
24	149.0000000	123.3296260	-25.6703720	9	75.0000000	0.686
25	89.0000000	81.4908450	-7.5091553	1	68.0000000	0.694
26	112.0000000	113.7954710	1.7954712	3	90.0000000	0.982
27	110.0000000	98.4215700	-11.5784302	18	95.0000000	1.303
28	117.0000000	128.6043700	11.6043701	19	107.0000000	1.400
29	148.0000000	135.8233180	-12.1766815	2	59.0000000	1.418
30	98.0000000	86.0111690	-11.9888306	7	94.0000000	1.798

Modelo:

MRF = $143,45 - 489,74U + 933,02UD + 3,00U^2D - 451,56UD^2 - 3,16U^2D^2$
 $R^2 = 0,55$, indicando razoável adequação do modelo.

Teste F:

Nível de significância $\alpha = 5\%$

F calculado = 5,78

F crítico = 2,62

F calculado > F crítico, indicando que o modelo é significante.

Teste t:

Nível de significância $\alpha = 0,25$

t crítico = 1,179

Variável U: $|t| = 1,593$

$|t| > t$ crítico indicando que a variável é
significante no modelo.

Variável UD: $|t| = 1,542$

$|t| > t$ crítico indicando que a variável é
significante no modelo.

Variável U^2D : $|t| = 1,972$

$|t| > t$ crítico indicando que a variável é
significante no modelo.

Variável UD^2 : $|t| = 1,488$

$|t| > t$ crítico indicando que a variável é
significante no modelo.

Variável U^2D^2 : $|t| = 2,012$

$|t| > t$ crítico indicando que a variável é
significante no modelo.

Resíduos:

Apresentam dispersão de pontos em torno da média.

3.4.2.3- Espécie: Pinus elliottii

No caso do Pinus elliottii, optou-se pela apresentação dos resultados experimentais analisados em conjunto, omitindo-se, sem perda de informações fundamentais, a apresentação dos resultados da análise efetuada por vigas.

Para esta espécie, os corpos de prova de flexão foram retirados de doze vigas, atendendo à já mencionada recomendação de Hellmeister.

Analogamente ao realizado para o Jatobá e para o Eucalipto Tereticornis, houve demorada e minuciosa manipulação de variáveis, tendo sido adotado o modelo estatístico a seguir para a análise de regressão:

$$\text{MRF} = \alpha + \beta_1 U + \beta_2 D + \beta_3 UD + \beta_4 U^2 D + \beta_5 UD^2$$

onde: MRF = módulo de resistência à flexão estática (MPa)

U = teor de umidade (%)

D = densidade (g/cm³)

$\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ = constantes

Na continuação é apresentado resumo da análise estatística efetuada.

SISREG (REGM) Centro De Informatica Na Agricultura - CIAGRI/USP Pag. 1

Titulo.....:ANALISE DE REGRESSAO PARA ESPECIE PINUS
 Projeto.....:DISSERTACAO DE MESTRADO
 Experimento.....:ENSAIO DE FLEXAO
 Data da medicao..:1986
 Arquivo gerado em:24/09/86
 Responsavel.....:RAQUEL EDONALVES TANAKAMI
 Data.....:02/09/1985
 Arquivo.....:A:PINUS4

Relacao de Variaveis	Valor Maximo	Valor Minimo	Media	Desvio
A=UP	42.90000000	0.00000000	12.7547170	10.8898730
B=DP	0.23000000	0.35000000	0.52566030	0.10499904
C=UPDP	35.60700000	0.00000000	7.13791509	7.25407583
D=U^2DP	1527.54030	0.00000000	165.549131	285.114158
E=UD^2P	29.5538100	0.00000000	4.18112851	5.41877030
MRFP	173.0000000	31.00000000	78.7169311	33.4418485

Variavel Dependente.....:MRFP
 Numero de Observacoes.....: 106
 Observacoes Perdidas.....: 0

UP : UP
 DP : DP
 UPDP : UPDP
 U^2DP : U^2DP
 UD^2P : UD^2P
 MRFP : MRFP

Desvio Padrao Residual.....: 11.07548722454415
 Coeficiente de Determinacao...: .8955386
 Graus de Liberdade do Residuo: 100
 Quadrado Medio do Residuo....: 122.6664172610407
 Valor de F.....: 171.4582
 Nivel de Significancia de F...: 0

Variavel	Est.Param.	Erro Padrao	t	P(>t)	Lim.Inf.	Lim.Sup.
Constante	-79.7493019					
UP	6.05040828	2.35204175	2.5724	1.1549	1.38401164	10.7168049
DP	380.938137	19.5661191	19.469	0.0000	342.119407	419.758868
UPDP	-25.5918827	7.45093334	-3.4347	0.0005	-40.3743628	-10.8094027
U^2DP	0.10701460	0.01926017	5.5563	0.0000	0.06880286	0.14522633
UD^2P	11.0036052	5.75058044	1.9135	5.8547	-0.40541386	22.4126244

SISREG [ESTIMA] Centro de Informatica na Agricultura - CIAGRI/USP Pag. 1

Arquivo.....:A:PINUS4

Variável	Identificação da Variável	Estim.Param
Const. :		-79.7493019
UP :	UP	6.05040820
DP :	DP	300.938137
UPDP :	UPDP	-25.5918827
U^2DP :	U^2DP	0.10701460
UD^2P :	UD^2P	11.0036052

-----ORDEM ORIGINAL DE ENTRADA----- ---ORDENADO EM e/s ---

Obs.	Y.Observado	Y.Estimado	Residuo	Obs.	Y.Observado	e/s
1	72.0000000	73.4092940	1.4092941	96	139.0000000	-2.100
2	74.0000000	67.3657070	-6.6342926	43	90.0000000	-2.061
3	77.0000000	70.4776150	-6.5223846	104	135.0000000	-1.918
4	68.0000000	60.3838200	-7.6161804	102	105.0000000	-1.837
5	71.0000000	66.3633420	-4.6366577	13	77.0000000	-1.557
6	77.0000000	77.8612140	0.8612137	50	100.0000000	-1.551
7	71.0000000	75.2630230	4.2630234	86	97.0000000	-1.513
8	87.0000000	84.9227370	-2.0772629	28	93.0000000	-1.328
9	53.0000000	51.9524540	-1.0475464	105	117.0000000	-1.245
10	134.0000000	128.3707580	-5.6292419	90	113.0000000	-1.230
11	102.0000000	89.0374220	-12.9625778	03	71.0000000	-1.229
12	101.0000000	91.4747770	-9.5252228	11	102.0000000	-1.170
13	77.0000000	59.7548940	-17.2451057	34	78.0000000	-1.083
14	130.0000000	120.0287630	-9.9712372	08	160.0000000	-1.010
15	79.0000000	74.3807680	-4.6192322	80	140.0000000	-0.924
16	62.0000000	65.5233610	3.5233612	14	130.0000000	-0.990
17	72.0000000	73.9381710	1.9381714	12	101.0000000	-0.860
18	67.0000000	71.1470870	4.1470871	44	77.0000000	-0.838
19	50.0000000	54.6038380	4.6038379	32	101.0000000	-0.813
20	80.0000000	76.0092940	-3.9107056	106	54.0000000	-0.771
21	53.0000000	73.6217960	20.6217957	59	51.0000000	-0.741
22	38.0000000	42.7037050	4.7037048	4	68.0000000	-0.688
23	120.0000000	132.2961730	12.2961731	66	52.0000000	-0.641
24	62.0000000	68.6126630	6.6126633	41	60.0000000	-0.617
25	94.0000000	87.2198410	-6.7801590	25	94.0000000	-0.612
26	61.0000000	70.6038440	9.6038437	2	74.0000000	-0.599
27	133.0000000	147.3457180	14.3457184	3	77.0000000	-0.589
28	93.0000000	78.2900920	-14.7099075	94	101.0000000	-0.556
29	89.0000000	82.9667210	-6.0332794	9	58.0000000	-0.546
30	93.0000000	101.1271890	8.1271896	29	89.0000000	-0.545
31	129.0000000	146.0524750	17.0524750	62	55.0000000	-0.544
32	101.0000000	91.9944690	-9.0055313	36	86.0000000	-0.540
33	61.0000000	67.6867520	6.6867523	10	134.0000000	-0.508
34	78.0000000	66.0070650	-11.9929352	68	64.0000000	-0.492
35	69.0000000	70.1941530	1.1941528	05	70.0000000	-0.487
36	86.0000000	80.0164260	-5.9835739	75	44.0000000	-0.467
37	70.0000000	66.2392270	-3.7607727	47	120.0000000	-0.420
38	92.0000000	107.8591380	15.8591385	5	71.0000000	-0.419
39	76.0000000	74.3965150	-1.6034851	15	79.0000000	-0.417
40	40.0000000	65.0870740	25.0870743	76	40.0000000	-0.362
41	60.0000000	53.1689910	-6.8310089	20	80.0000000	-0.353
42	119.0000000	119.8433530	0.8433533	37	70.0000000	-0.340
43	90.0000000	67.1772920	-22.8227081	77	52.0000000	-0.315
44	77.0000000	67.7206120	-9.2793884	71	41.0000000	-0.298
45	113.0000000	117.9355160	4.9355164	02	167.0000000	0.266

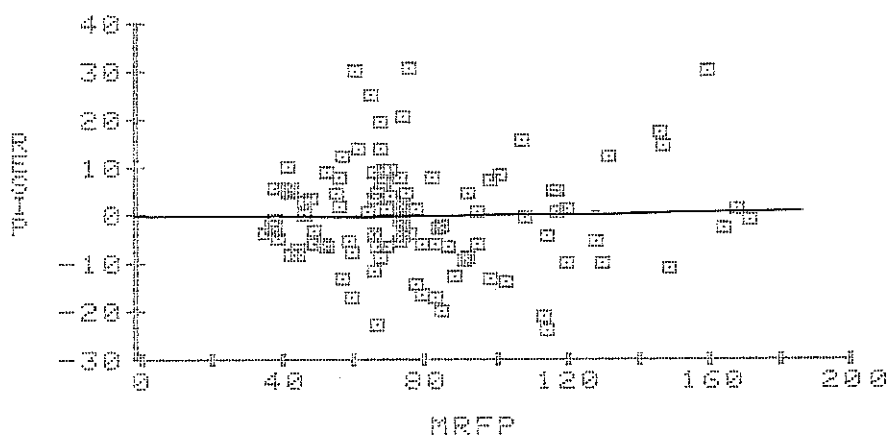
SISREG [ESTIMA] Centro de Informatica na Agricultura - CIABRI/USP Pag. 2

46	74.00000000	81.6036990	7.6036987	73	87.00000000	-0.266
47	120.00000000	115.3448030	-4.6551971	8	87.00000000	-0.188
48	45.00000000	75.9744420	30.9744415	61	39.00000000	-0.183
49	48.00000000	62.0480610	14.0480614	39	78.00000000	-0.145
50	100.00000000	82.8170170	-17.1829834	84	173.00000000	-0.120
51	45.00000000	48.1557120	3.1557121	100	74.00000000	-0.097
52	44.00000000	53.1616710	9.1616707	95	39.00000000	-0.092
53	36.00000000	41.4828530	5.4828529	97	110.00000000	-0.069
54	64.00000000	64.4649280	0.4649277	64	46.00000000	0.009
55	57.00000000	65.9124600	8.9124603	99	73.00000000	0.017
56	54.00000000	68.0318450	14.0318451	54	64.00000000	0.042
57	55.00000000	56.4241520	1.4241524	79	95.00000000	0.044
58	32.00000000	41.7923160	9.7923164	81	117.00000000	0.063
59	51.00000000	42.7935220	-8.2064781	42	119.00000000	0.076
60	48.00000000	55.8038640	7.8038635	91	167.00000000	0.078
61	39.00000000	36.9883570	-2.0116429	6	77.00000000	0.078
62	55.00000000	48.9774700	-6.0225296	35	69.00000000	0.100
63	32.00000000	37.8908230	5.8908226	1	72.00000000	0.127
64	46.00000000	46.1014980	0.1014977	57	55.00000000	0.129
65	43.00000000	45.6033630	2.6033630	17	72.00000000	0.175
66	52.00000000	44.9042820	-7.0957184	65	43.00000000	0.235
67	65.00000000	72.7131960	7.7131958	51	45.00000000	0.285
68	64.00000000	58.5554810	-5.4445190	16	62.00000000	0.318
69	37.00000000	41.9778400	4.9778404	18	67.00000000	0.374
70	63.00000000	67.2529140	4.2529144	70	63.00000000	0.384
71	41.00000000	37.6943890	-3.3056107	7	71.00000000	0.385
72	38.00000000	42.4316560	4.4316559	72	38.00000000	0.400
73	87.00000000	84.0540920	-2.9459076	87	87.00000000	0.422
74	31.00000000	61.1978070	30.1978073	19	50.00000000	0.423
75	44.00000000	38.8243280	-5.1756717	22	38.00000000	0.425
76	40.00000000	35.9899710	-4.0100288	98	112.00000000	0.439
77	52.00000000	48.5108530	-3.4891472	45	113.00000000	0.446
78	37.00000000	42.5455510	5.5455513	69	37.00000000	0.449
79	95.00000000	95.4822390	0.4822388	53	36.00000000	0.495
80	140.00000000	129.7466780	-10.2533221	78	37.00000000	0.501
81	117.00000000	117.8984630	0.8984634	63	32.00000000	0.514
82	167.00000000	164.0511020	-2.9488983	24	62.00000000	0.597
83	71.00000000	57.3084280	-13.6115723	33	61.00000000	0.684
84	173.00000000	171.6698760	-1.3301239	93	92.00000000	0.658
85	78.00000000	72.6060180	-5.3939819	46	74.00000000	0.687
86	97.00000000	80.2447050	-16.7552948	67	65.00000000	0.696
87	87.00000000	91.6728520	4.6728516	60	48.00000000	0.705
88	160.00000000	148.8135830	-11.1864166	30	93.00000000	0.734
89	45.00000000	57.3884280	12.3884277	55	57.00000000	0.805
90	113.00000000	99.2916180	-13.7083817	52	44.00000000	0.827
91	167.00000000	167.8604740	0.8604736	103	60.00000000	0.844
92	130.00000000	160.2417140	30.2417145	26	61.00000000	0.867
93	92.00000000	99.2916180	7.2916183	58	32.00000000	0.884
94	101.00000000	94.8401490	-6.1598511	23	120.00000000	1.110
95	39.00000000	37.9814220	-1.0185776	89	45.00000000	1.119
96	139.00000000	114.8503490	-24.1496506	56	54.00000000	1.267
97	110.00000000	109.2398530	-0.7601471	49	48.00000000	1.268
98	112.00000000	116.8611760	4.8611755	27	133.00000000	1.295
99	73.00000000	73.1866150	0.1866150	38	92.00000000	1.432
100	74.00000000	72.9240040	-1.0759964	31	129.00000000	1.540
101	48.00000000	67.8138430	19.8138428	101	48.00000000	1.789
102	105.00000000	84.6582030	-20.3417969	21	53.00000000	1.862
103	60.00000000	69.3430480	9.3430481	40	40.00000000	2.265

SISREG [ESTIMA] Centro de Informatica na Agricultura - CIAGRI/USP Pag. 3

104	135.0000000	113.7534100	-21.2465897	74	31.0000000	2.727
105	117.0000000	103.2131500	-13.7868500	92	130.0000000	2.731
106	54.0000000	45.4640050	-8.5359955	48	45.0000000	2.797

Diagrama de Resíduos Contra a Variável Dependente MRF



Modelo:

$$\text{MRF} = -79,75 + 6,05U + 380,94D - 25,59UD + 0,107U^2D + 11,00UD^2$$

$R^2 = 0,90$, indicando ótima adequação do modelo.

Teste F:

Nível de significância de $\alpha = 5\%$

F calculado = 171,46

F crítico = 2,37

F calculado > F crítico, indicando que o modelo é altamente significativo.

Teste t:

Nível de significância $\alpha = 0,10$

t crítico = 1,671

Variável U: $|t| = 2,572$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é altamente significativa no modelo.

Variável D: $|t| = 19,469$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é altamente significativa no modelo.

Variável UD: $|t| = 3,4347$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é altamente significativa no modelo.

Variável U^2D : $|t| = 5,5563$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é altamente significativa no modelo.

Variável UD^2 : $|t| = 1,9135$

$|t| > t$ crítico indicando que a variável é significativa no modelo.

Resíduos:

Apresentam dispersão de pontos em torno da média.

3.4.2.4- Resultados obtidos da análise estatística realizada para todas as espécies estudadas

Com o intuito de generalizar a análise estatística desenvolvida para estudar a influência da umidade e da densidade da madeira em sua resistência à flexão, buscou-se obter um modelo matemático compatível para relacionar os referidos parâmetros, não limitado a espécies. Para as três espécies estudadas tomou-se a precaução de se alcançar ampla variação de densidades (foram obtidos corpos de prova com 0,35 até 1,20 g/cm³) e de umidades (foram obtidos corpos de prova com teores de umidade a partir de 0% até níveis superiores ao ponto de saturação das fibras).

Depois de longa e minuciosa manipulação de dados, o objetivo pareceu ter sido totalmente atingido, como poderá ser observado adiante.

O modelo de regressão múltipla admitido para a análise conjunta dos resultados experimentais obtidos para o Jatobá, o Eucalipto Tereticornis e o Pinus Elliottii foi:

$$\begin{aligned} \text{MRF} = & \alpha + \beta_1 U + \beta_2 D + \beta_3 UD + \beta_4 U^2 D + \beta_5 U^3 D + \beta_6 UD^2 + \\ & + \beta_7 UD^3 + \beta_8 U^2 D^2 + \beta_9 U^3 D^3 \end{aligned}$$

onde: MRF = módulo de resistência à flexão estática (MPa)
 U = teor de umidade (%)
 D = densidade (g/cm³)
 $\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8, \beta_9$ = constantes

Resumo da análise estatística efetuada é apresentada a seguir.

SISREG [REGM]

Centro De Informatica Na Agricultura - CIAGRI/USP

Pag. 1

Titulo.....:ANALISE ESTATISTICA PARA TODAS AS ESPECIES ESTUDADAS
 Projeto.....:DISSERTACAO DE MESTRADO
 Experimento.....:ENSAIO DE FLEXAO ESTATICA
 Data da medicao...:1985 A 1986
 Arquivo gerado em:29/09/86
 Responsavel.....:RAQUEL GONCALVES TANAAMI
 Data.....:02/09/1985
 Arquivo.....:A:GLOBAL2

Relacao de Variaveis	Valor Maximo	Valor Minimo	Media	Desvio
A=UG	50.5000000	0.0000000	15.2213439	11.4371410
B=DG	1.1900000	0.3500000	0.7747430	0.2331045
C=UDG	53.5300000	0.0000000	12.8133874	11.6489440
D=U^2DG	2703.26500	0.0000000	318.922908	453.531716
E=U^3DG	136514.883	0.0000000	9518.30736	18108.8908
F=UD^2G	58.4820200	0.0000000	11.5951561	12.6608098
G=UD^3G	66.0846826	0.0000000	11.0151417	13.8088339
H=U^2D^2	2865.46090	0.0000000	299.344437	476.283229
I=U^3D^3	153388.122	0.0000000	9074.87540	20112.7727
MRFG	305.000000	31.000000	112.197628	46.2017710

Variavel Dependente.....:MRFG
 Numero de Observacoes.....: 253
 Observacoes Perdidas.....: 0

UG : UG
 DG : DG
 UDG : UG*DG
 U^2DG : UG*DG*UG
 U^3DG : UG*DG*UG*UG
 UD^2G : UG*DG*DG
 UD^3G : UG*DG*DG*DG
 U^2D^2 : UG*DG*UG*DG
 U^3D^3 : UG*DG*UG*DG*UG*DG
 MRFG : MRFG

Desvio Padrao Residual.....: 22.94150914785445
 Coeficiente de Determinacao...: .7622435
 Graus de Liberdade do Residuo: 140
 Quadrado Medio do Residuo.....: 526.3128419810893
 Valor de F.....: 86.56155
 Nivel de Significancia de F...: 5.960465E-06

Variavel	Est.Param.	Erro Padrao	t	P(>t)	Lim.Inf.	Lim.Sup.
Constante	-25.1280189					
UG	-7.42667660	5.14111683	-1.4446	15.0081	-17.5913510	2.73799778
DG	251.931999	17.0328133	14.791	0.0000	218.255853	285.608145
UDG	35.0224970	20.7386247	1.6888	9.3492	-5.98053285	76.0255269
U^2DG	-0.41120717	0.24345392	-1.6891	9.3436	-0.89254807	0.07013374
U^3DG	0.00285244	0.00271931	1.0857	27.946	-0.00242399	0.00832887
UD^2G	-56.9570339	26.3179741	-2.1642	3.2146	-108.991183	-4.92288531
UD^3G	20.3728598	10.6751716	1.9084	5.8382	-0.73337962	41.4790993
U^2D^2	0.63855256	0.24878650	2.5667	1.1318	0.14666843	1.13043670
U^3D^3	-0.00503147	0.00244753	-2.0557	4.1666	-0.00987057	-0.00019237

Arquivo.....:A:GLOBAL3

Variavel	Identificacao da Variavel	Estim.Param
Const.		-25.1280149
UG	UG	-7.42667640
OG	OG	251.931999
UDG	UDG	35.0224970
U^2DG	U^2DG	-0.41120717
U^3DG	U^3DG	0.00295244
UD^2G	UD^2G	-51.9570339
UD^3G	UD^3G	20.3728598
U^2D^2	U^2D^2	0.63855256
U^3D^3	U^3D^3	-0.00503147
MRFG	MRFG	

Durbin-Watson : .8064461

Coef. R..... : .5967806

-----ORDEN ORIGINAL DE ENTRADA----- ---ORDENADO EM e/s ---

Obs.	Y.Observado	Y.Estimado	Residuo	Obs.	Y.Observado	e/s
1	72.0000000	76.6515660	4.6515660	134	265.0000000	-2.933
2	74.0000000	73.1636480	-0.8363520	132	208.0000000	-2.859
3	77.0000000	74.2021710	-2.7978287	160	235.0000000	-2.691
4	68.0000000	66.2818530	-1.7181470	159	245.0000000	-2.536
5	71.0000000	72.4530640	1.4530640	155	209.0000000	-2.537
6	77.0000000	82.7606430	5.7606430	158	181.0000000	-2.277
7	71.0000000	80.5987630	9.5987625	150	214.0000000	-2.205
8	67.0000000	68.2813800	1.2813797	157	305.0000000	-2.091
9	58.0000000	58.4480060	-1.5519943	156	180.0000000	-2.063
10	134.0000000	113.4520870	-20.5479126	151	215.0000000	-1.849
11	102.0000000	91.2558750	-10.7441254	153	172.0000000	-1.619
12	101.0000000	92.9386000	-8.0614000	148	174.0000000	-1.588
13	77.0000000	85.5923920	-11.4073920	143	194.0000000	-1.508
14	130.0000000	109.4362180	-20.5637817	88	160.0000000	-1.481
15	79.0000000	79.8838730	0.8838730	215	172.0000000	-1.439
16	62.0000000	71.7479710	9.7479710	84	173.0000000	-1.388
17	72.0000000	76.5351940	4.5351944	140	146.0000000	-1.379
18	67.0000000	77.3132100	10.3132095	186	149.0000000	-1.371
19	50.0000000	59.7549880	9.7549885	165	144.0000000	-1.366
20	80.0000000	81.4666400	1.4666400	161	162.0000000	-1.367
21	53.0000000	79.4718330	26.4718330	96	139.0000000	-1.348
22	38.0000000	37.4455740	-0.5544260	82	167.0000000	-1.347
23	120.0000000	118.4845120	-1.5154880	117	161.0000000	-1.307
24	62.0000000	74.0550380	12.0550385	191	169.0000000	-1.279
25	94.0000000	89.1145550	-4.8854450	91	167.0000000	-1.237
26	61.0000000	75.7993930	14.7993927	104	135.0000000	-1.220
27	133.0000000	125.4462050	-7.5537949	183	136.0000000	-1.198
28	93.0000000	82.4548650	-10.5451350	80	140.0000000	-1.158
29	89.0000000	86.2394490	-2.7605510	144	143.0000000	-1.147
30	93.0000000	99.4274980	6.4274979	218	175.0000000	-1.138
31	129.0000000	124.0302430	-4.9697570	138	129.0000000	-1.109
32	101.0000000	93.2342610	-7.7657390	142	133.0000000	-1.063
33	61.0000000	73.4668120	12.4668120	188	143.0000000	-1.035
34	78.0000000	71.8281560	-6.1718440	149	153.0000000	-0.978
35	69.0000000	75.6136780	6.6136780	137	178.0000000	-0.957
36	86.0000000	83.9265140	-2.0734860	14	130.0000000	-0.896
37	70.0000000	72.0343400	2.0343399	10	134.0000000	-0.896
38	92.0000000	103.7255400	11.7255402	220	158.0000000	-0.894
39	76.0000000	77.6408000	1.6408000	216	157.0000000	-0.860
40	40.0000000	70.9481510	30.9481510	90	113.0000000	-0.860
41	60.0000000	60.1708830	0.1708832	102	185.0000000	-0.826

SISREG (ESTIMAJ) Centro de Informatica na Agricultura - CIAGRI/USP Pag. 2

42	119.0000000	111.1112210	-7.8887787	201	156.0000000	-0.813
43	96.0000000	72.8818540	-17.1181459	146	135.0000000	-0.795
44	77.0000000	72.8613530	-4.1386465	75	44.0000000	-0.773
45	113.0000000	107.3544000	-5.6456000	43	90.0000000	-0.747
46	74.0000000	82.7301480	8.7301483	136	173.0000000	-0.722
47	120.0000000	106.1233440	-13.8766556	192	140.0000000	-0.716
48	45.0000000	79.0219960	34.0219960	86	97.0000000	-0.711
49	43.0000000	68.3409040	20.3409042	105	117.0000000	-0.711
50	100.0000000	85.9004970	-14.0995026	162	130.0000000	-0.702
51	45.0000000	57.6925890	12.6925888	193	158.0000000	-0.698
52	44.0000000	57.5938710	13.5938707	95	39.0000000	-0.653
53	56.0000000	43.4226760	-7.4226761	131	123.0000000	-0.643
54	64.0000000	71.4965440	7.4965439	145	117.0000000	-0.633
55	57.0000000	72.6685790	15.6685791	50	100.0000000	-0.615
56	54.0000000	74.5190890	20.5190887	47	120.0000000	-0.603
57	55.0000000	62.6895600	-7.6895599	236	183.0000000	-0.593
58	32.0000000	36.9053880	4.9053879	128	119.0000000	-0.585
59	51.0000000	45.5792010	-5.4207993	147	132.0000000	-0.589
60	43.0000000	61.0216100	13.0216103	166	140.0000000	-0.550
61	39.0000000	29.1949043	-9.8050957	63	32.0000000	-0.529
62	53.0000000	51.0176580	-3.9823418	76	40.0000000	-0.507
63	32.0000000	19.0803172	-12.1396828	13	77.0000000	-0.497
64	46.0000000	48.1872860	2.1872864	11	102.0000000	-0.468
65	43.0000000	44.9438910	1.9438913	28	93.0000000	-0.460
66	32.0000000	47.5025330	-4.4974670	61	39.0000000	-0.427
67	65.0000000	78.7736660	13.7736664	223	162.0000000	-0.427
68	64.0000000	64.5368500	0.5368500	168	181.0000000	-0.401
69	37.0000000	39.0331270	2.0331268	139	121.0000000	-0.373
70	63.0000000	74.1178280	11.1178284	135	155.0000000	-0.361
71	41.0000000	33.1736030	-7.8263969	12	101.0000000	-0.351
72	38.0000000	40.8581850	2.8581848	42	119.0000000	-0.344
73	87.0000000	83.2027440	-3.7972565	123	154.0000000	-0.343
74	31.0000000	68.0868230	37.0868230	132	119.0000000	-0.342
75	44.0000000	26.2581635	-17.7418365	71	41.0000000	-0.341
76	40.0000000	28.3716164	-11.6283836	32	101.0000000	-0.339
77	52.0000000	53.2864340	1.2864342	221	116.0000000	-0.338
78	37.0000000	43.5809780	6.5809784	163	119.0000000	-0.336
79	95.0000000	90.7607040	-4.2392960	27	133.0000000	-0.329
80	140.0000000	113.4345860	-26.5654144	81	117.0000000	-0.319
81	117.0000000	109.6756130	-7.3243866	113	141.0000000	-0.305
82	167.0000000	136.1034890	-30.8965105	190	140.0000000	-0.298
83	71.0000000	65.5675050	-5.4324951	112	125.0000000	-0.296
84	173.0000000	141.1471100	-31.8528900	219	163.0000000	-0.292
85	78.0000000	77.1236570	-0.8763430	118	136.0000000	-0.289
86	97.0000000	80.6834180	-16.3165817	34	78.0000000	-0.289
87	87.0000000	88.2413790	1.2413783	97	110.0000000	-0.267
88	180.0000000	126.0311090	-53.9688910	94	101.0000000	-0.263
89	45.0000000	65.5675050	20.5675049	45	113.0000000	-0.248
90	113.0000000	93.2800220	-19.7199783	213	90.0000000	-0.237
91	167.0000000	138.6277770	-28.3722229	63	71.0000000	-0.237
92	130.0000000	133.5891420	3.5891418	59	51.0000000	-0.236
93	92.0000000	93.2800220	1.2800217	31	129.0000000	-0.217
94	101.0000000	94.9754870	-6.0245132	197	104.0000000	-0.216
95	39.0000000	24.0104084	-14.9895916	25	94.0000000	-0.213
96	139.0000000	108.0691910	-30.9308090	66	52.0000000	-0.196
97	110.0000000	103.8703380	-6.1296618	134	101.0000000	-0.195
98	112.0000000	109.0113830	-2.9886169	79	95.0000000	-0.185
99	73.0000000	77.7803570	4.7803574	141	226.0000000	-0.185

SISREG [ESTIMA] Centro de Informatica na Agricultura - CIAGRI/USP Pag. 3

100	74.0000000	77.5857010	3.5857010	44	77.0000000	-0.183
101	48.0000000	73.1934510	25.1934509	62	55.0000000	-0.174
102	105.0000000	84.0388720	-18.9611282	73	87.0000000	-0.166
103	60.0000000	74.6462940	14.6462936	194	136.0000000	-0.149
104	135.0000000	107.0040130	-27.9959869	234	143.0000000	-0.133
105	117.0000000	100.6967010	-16.3032990	98	112.0000000	-0.130
106	54.0000000	53.0265050	-0.9734955	214	102.0000000	-0.128
107	105.0000000	121.9184720	16.9184723	109	112.0000000	-0.126
108	122.0000000	135.5959930	13.5959930	110	111.0000000	-0.125
109	112.0000000	109.1010280	-2.8989716	3	77.0000000	-0.122
110	111.0000000	108.1371080	-2.8628922	29	89.0000000	-0.120
111	137.0000000	141.1398320	4.1398315	187	118.0000000	-0.098
112	125.0000000	118.2089840	-6.7910156	253	98.0000000	-0.093
113	141.0000000	134.0023350	-6.9976654	36	86.0000000	-0.090
114	113.0000000	116.9419100	3.9419098	222	151.0000000	-0.089
115	89.0000000	94.7619550	5.7619553	4	68.0000000	-0.075
116	112.0000000	112.5992130	0.5992127	9	58.0000000	-0.068
117	161.0000000	131.0207080	-29.9792938	217	136.0000000	-0.067
118	136.0000000	129.3688350	-6.6311646	23	129.0000000	-0.066
119	96.0000000	116.2328430	20.2328433	106	54.0000000	-0.042
120	88.0000000	102.5910420	14.5910416	85	78.0000000	-0.038
121	97.0000000	108.3814320	11.3814316	2	74.0000000	-0.036
122	129.0000000	152.2120670	23.2120667	22	38.0000000	-0.024
123	154.0000000	148.11235050	-7.88764954	199	101.0000000	-0.016
124	114.0000000	122.1109240	8.1109238	185	123.0000000	-0.007
125	104.0000000	120.4584120	14.4584122	41	60.0000000	0.007
126	91.0000000	113.9324570	22.9324570	127	128.0000000	0.013
127	128.0000000	128.3026430	0.3026428	68	64.0000000	0.023
128	119.0000000	106.0377200	-12.9622803	116	112.0000000	0.026
129	136.0000000	162.3640140	26.3640137	203	140.0000000	0.027
130	204.0000000	219.2460330	15.2460327	212	134.0000000	0.027
131	123.0000000	108.2537690	-14.7462311	181	143.0000000	0.037
132	119.0000000	111.1506810	-7.8493195	15	79.0000000	0.039
133	157.0000000	162.4535060	5.4535065	184	109.0000000	0.054
134	101.0000000	96.5179670	-4.4820328	87	87.0000000	0.054
135	155.0000000	146.7198490	-8.2801514	93	92.0000000	0.056
136	173.0000000	156.4253690	-16.5746307	8	87.0000000	0.056
137	178.0000000	156.0392910	-21.9607086	77	52.0000000	0.056
138	129.0000000	103.5402260	-25.4397736	5	71.0000000	0.063
139	121.0000000	112.4473190	-8.5526810	20	80.0000000	0.064
140	146.0000000	114.3588490	-31.6411514	202	98.0000000	0.064
141	226.0000000	221.7653500	-4.2346497	172	126.0000000	0.065
142	133.0000000	108.6000860	-24.3999144	39	76.0000000	0.072
143	194.0000000	159.4026340	-34.5973660	65	43.0000000	0.085
144	143.0000000	116.6869890	-26.3130112	69	37.0000000	0.089
145	117.0000000	102.4232560	-14.5767441	37	70.0000000	0.089
146	135.0000000	116.7678760	-18.2321243	231	100.0000000	0.092
147	132.0000000	119.1697540	-12.8302460	182	135.0000000	0.093
148	174.0000000	137.5620730	-36.4379270	64	46.0000000	0.095
149	153.0000000	130.5360300	-22.4639697	72	38.0000000	0.125
150	214.0000000	163.4222110	-50.5777890	100	74.0000000	0.156
151	215.0000000	172.5830230	-42.4169770	92	130.0000000	0.156
152	208.0000000	142.3995060	-65.6004940	114	113.0000000	0.172
153	172.0000000	134.8483890	-37.1516110	111	137.0000000	0.180
154	265.0000000	197.7139890	-67.2860110	17	72.0000000	0.198
155	209.0000000	150.8023680	-58.1976320	1	72.0000000	0.203
156	180.0000000	132.6797940	-47.3202060	99	73.0000000	0.208
157	305.0000000	257.0358300	-47.9641700	58	32.0000000	0.214

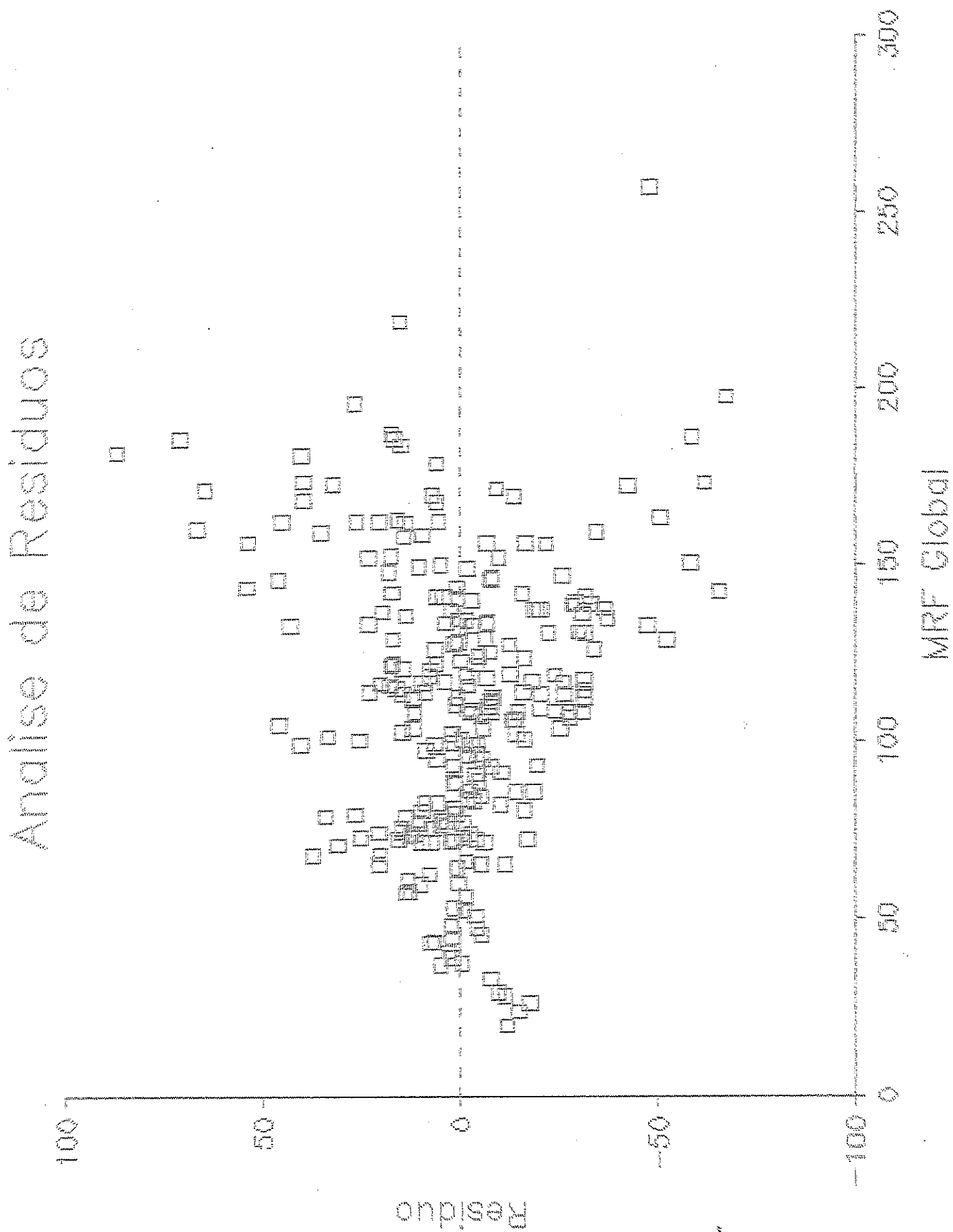
SISREG [ESTIMA] Centro de Informatica na Agricultura - CIAGRI/USP Pag. 4

158	181.0000000	128.7540740	-52.2459260	170	145.0000000	0.220
159	245.0000000	186.3357840	-58.6642160	133	157.0000000	0.238
160	235.0000000	173.2651820	-61.7348180	6	77.0000000	0.251
161	162.0000000	130.8281890	-31.1718109	115	89.0000000	0.251
162	130.0000000	113.8992940	-16.1007060	238	89.0000000	0.252
163	119.0000000	111.2908550	-7.7091450	189	173.0000000	0.259
164	99.0000000	115.1090240	16.1090240	205	162.0000000	0.260
165	144.0000000	112.6120300	-31.3879700	200	135.0000000	0.260
166	140.0000000	127.3870470	-12.6129530	124	116.0000000	0.266
167	107.0000000	111.9267430	11.9267430	208	120.0000000	0.272
168	181.0000000	171.8001250	-9.1998750	30	93.0000000	0.280
169	189.0000000	183.9755400	14.9755400	78	37.0000000	0.287
170	145.0000000	150.0493160	5.0493160	35	69.0000000	0.288
171	134.0000000	173.8243260	39.8243260	180	163.0000000	0.305
172	126.0000000	127.4949650	1.4949650	177	113.0000000	0.320
173	104.0000000	121.5302200	17.5302200	53	36.0000000	0.324
174	111.0000000	118.7167510	7.7167510	54	64.0000000	0.327
175	124.0000000	159.1809230	35.1809230	57	55.0000000	0.335
176	139.0000000	149.5168460	10.5168460	174	111.0000000	0.336
177	113.0000000	120.3427050	7.3427050	248	89.0000000	0.377
178	141.0000000	181.2445830	40.2445830	46	74.0000000	0.381
179	142.0000000	162.4277650	20.4277650	244	105.0000000	0.388
180	163.0000000	169.9881900	6.9881900	247	149.0000000	0.415
181	143.0000000	143.8482970	0.8482970	7	71.0000000	0.418
182	135.0000000	137.1350560	2.1350560	245	107.0000000	0.418
183	136.0000000	108.5205170	-27.4794830	16	82.0000000	0.425
184	109.0000000	110.2310030	1.2310030	19	50.0000000	0.425
185	123.0000000	122.8419880	-0.1580120	18	67.0000000	0.430
186	149.0000000	117.5584540	-31.4415460	176	139.0000000	0.458
187	118.0000000	115.7433330	-2.2566670	70	63.0000000	0.485
188	143.0000000	118.8054810	-24.1945190	121	97.0000000	0.498
189	173.0000000	278.9389050	5.9389050	38	92.0000000	0.511
190	140.0000000	133.1544650	-6.8455350	167	100.0000000	0.520
191	169.0000000	139.6573940	-29.3426060	24	62.0000000	0.525
192	140.0000000	123.5836560	-16.4163440	33	61.0000000	0.543
193	158.0000000	142.8339360	-15.1660640	51	45.0000000	0.553
194	136.0000000	132.5883480	-3.4116520	60	48.0000000	0.568
195	147.0000000	162.7781370	15.7781370	52	44.0000000	0.593
196	135.0000000	152.4338500	17.4338500	108	122.0000000	0.593
197	104.0000000	99.0518880	-4.9481120	67	65.0000000	0.600
198	117.0000000	136.5506290	19.5506290	252	148.0000000	0.607
199	101.0000000	100.6355740	-0.3644260	209	144.0000000	0.614
200	135.0000000	140.9713000	5.9713000	125	106.0000000	0.630
201	156.0000000	137.3596190	-18.6403810	237	99.0000000	0.631
202	98.0000000	99.4633100	1.4633100	120	88.0000000	0.636
203	140.0000000	140.6159060	0.6159060	103	60.0000000	0.638
204	110.0000000	133.2960970	23.2960970	26	61.0000000	0.645
205	162.0000000	167.9656520	5.9656520	169	169.0000000	0.653
206	100.0000000	146.0285190	46.0285190	130	204.0000000	0.665
207	125.0000000	142.2204440	17.2204440	55	57.0000000	0.683
208	120.0000000	126.2419510	6.2419510	195	147.0000000	0.688
209	144.0000000	158.0841060	14.0841060	164	99.0000000	0.702
210	169.0000000	185.6869510	16.6869510	210	169.0000000	0.727
211	169.0000000	195.8170170	26.8170170	107	105.0000000	0.737
212	134.0000000	134.6266480	0.6266480	249	112.0000000	0.743
213	90.0000000	84.5638890	-5.4361110	207	125.0000000	0.751
214	102.0000000	99.0649340	-2.9350660	243	170.0000000	0.764
215	172.0000000	130.9887240	-33.0112760	173	104.0000000	0.764

SISREG [ESTIMA] Centro de Informatica na Agricultura - CIAGRI/USP Pag. 5

216	157.0000000	137.2784880	-19.7215118	196	135.0000000	0.789
217	136.0000000	134.4564030	-1.5435970	235	98.0000000	0.771
218	173.0000000	146.8885450	-26.1114549	233	130.0000000	0.785
219	163.0000000	156.3035740	-6.6964260	198	117.0000000	0.852
220	158.0000000	137.4921420	-20.5078580	119	98.0000000	0.882
221	116.0000000	108.2438890	-7.7561110	49	48.0000000	0.887
222	151.0000000	149.9694210	-1.0305790	179	142.0000000	0.890
223	162.0000000	152.2117770	-9.7882230	56	54.0000000	0.894
224	68.0000000	101.4932940	33.4932940	89	45.0000000	0.897
225	59.0000000	104.6407240	45.6407240	126	91.0000000	1.000
226	90.0000000	145.8489690	55.8489690	122	129.0000000	1.012
227	59.0000000	99.2829970	40.2829970	250	110.0000000	1.015
228	115.0000000	185.9788970	70.9788970	204	110.0000000	1.015
229	103.0000000	156.5625920	53.5625920	101	48.0000000	1.098
230	94.0000000	160.3955690	66.3955690	232	75.0000000	1.108
231	100.0000000	102.1213840	2.1213840	129	136.0000000	1.149
232	75.0000000	100.4079590	25.4079590	21	53.0000000	1.154
233	130.0000000	148.0120390	18.0120390	211	169.0000000	1.169
234	143.0000000	139.9561000	-3.0438990	40	40.0000000	1.349
235	98.0000000	115.6779710	17.6779710	240	141.0000000	1.404
236	183.0000000	169.3684740	-13.6315260	224	68.0000000	1.460
237	99.0000000	113.4855730	14.4855730	48	45.0000000	1.483
238	89.0000000	94.7744750	5.7744750	175	124.0000000	1.534
239	90.0000000	132.9840330	42.9840330	74	31.0000000	1.617
240	141.0000000	173.2153470	32.2153470	244	129.0000000	1.726
241	95.0000000	181.8616790	86.8616790	171	134.0000000	1.736
242	107.0000000	171.5895840	64.5895840	178	141.0000000	1.754
243	170.0000000	187.5253440	17.5253440	227	59.0000000	1.756
244	129.0000000	148.5975190	19.5975190	239	90.0000000	1.874
245	107.0000000	114.5997660	7.5997660	251	117.0000000	1.971
246	105.0000000	113.9665320	8.9665320	225	59.0000000	1.989
247	149.0000000	158.5180510	9.5180510	206	100.0000000	2.006
248	89.0000000	97.6397470	8.6397470	229	103.0000000	2.335
249	112.0000000	129.0366210	17.0366210	226	90.0000000	2.347
250	110.0000000	133.2945090	23.2945090	242	107.0000000	2.815
251	117.0000000	162.2182460	45.2182460	230	94.0000000	2.894
252	148.0000000	161.9161530	13.9161530	228	115.0000000	3.094
253	98.0000000	95.8595960	-2.1404040	241	95.0000000	3.786

Diagrama de Resíduos Contra a Variável Dependente MRF



Modelo:

$$\text{MRF} = -25,128 - 7,427U + 251,932D + 35,022UD - 0,4111U^2D + 0,003U^3D - \\ -56,957UD^2 + 20,373UD^3 + 0,639U^2D^2 - 0,005U^3D^3$$

$R^2 = 0,76$, indicando a ótima adequação do modelo.

Teste F:

Nível de significância $\alpha = 5\%$

F calculado = 86,56

F crítico = 1,88

F calculado > F crítico, indicando que o modelo é altamente significativa.

Teste t:

Nível de significância $\alpha = 0,25$

t crítico = 1,15

Variável U: $|t| = 1,445$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é significativa no modelo.

Variável D: $|t| = 14,791$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é altamente significativa no modelo.

Variável UD: $|t| = 1,689$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é significativa no modelo.

Variável U^2D : $|t| = 1,689$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável é significativa no modelo.

Variável U^3D : $|t| \cong 1,086$

$|t| > t$ crítico, indicando que a variável não é significativa no modelo.

Variável UD^2 : $|t| = 2,164$
 $|t| > t$ crítico, indicando que a variável é
significante no modelo.

Variável UD^3 : $|t| = 1,908$
 $|t| > t$ crítico, indicando que a variável é
significante no modelo.

Variável U^2D^2 : $|t| = 2,567$
 $|t| > t$ crítico, indicando que a variável
é significante no modelo.

Variável U^3D^3 : $|t| = 2,056$
 $|t| > t$ crítico, indicando que a variável
é significante no modelo.

Resíduos:

Apresentam dispersão de pontos em torno da média.

3.5- GRÁFICOS RELACIONANDO UMIDADE, DENSIDADE E MÓDULO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA

A partir dos resultados da análise estatística apresentados nos itens anteriores, foram construídos inicialmente diagramas por espécie. Como era de esperar, para o Jatobá e para o *Pinus Elliottii*, a representação gráfica se constituiu em curvas compatíveis com o fenômeno estudado. No uso do Eucalipto *Tereticornis*, à vista dos comentários exarados em 3.4.2.2, a equação obtida não é adequada para a representação da relação desejada. Por estas razões, a seguir são apresentados os seguintes diagramas:

- . para o Jatobá: diagrama relacionando a umidade e o módulo de resistência à flexão, para diversos níveis de densidade;

- . para o Jatobá: diagrama relacionando a densidade e o módulo de resistência à flexão, para diversos níveis de umidade;

- . para o *Pinus Elliottii*: diagrama relacionando a umidade e o módulo de resistência à flexão, para diversos níveis de densidade;

- . para o *Pinus Elliottii*: diagrama relacionando a densidade e o módulo de resistência à flexão, para diversos níveis de umidade;

- . para todas as espécies estudadas: diagrama relacionando a umidade e o módulo de resistência à flexão, para diversos níveis de densidade;

- . para todas as espécies estudadas: diagrama relacionando a densidade e o módulo de resistência à flexão, para diversos níveis de umidade.

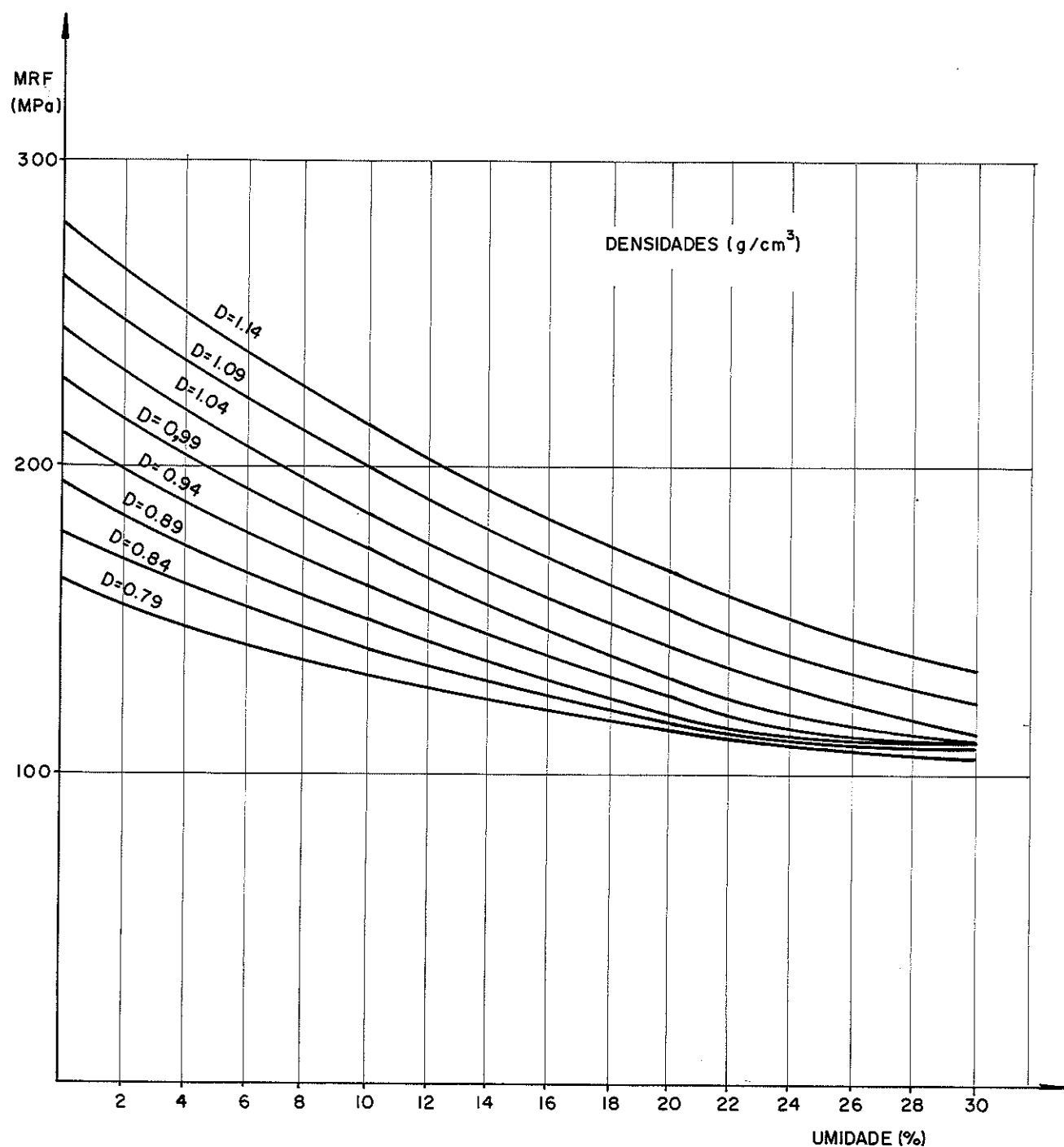


Fig. 3.6- Diagrama relacionado a umidade e o módulo de resistência à flexão, para diversos níveis de densidade - espécie: Jatobá.

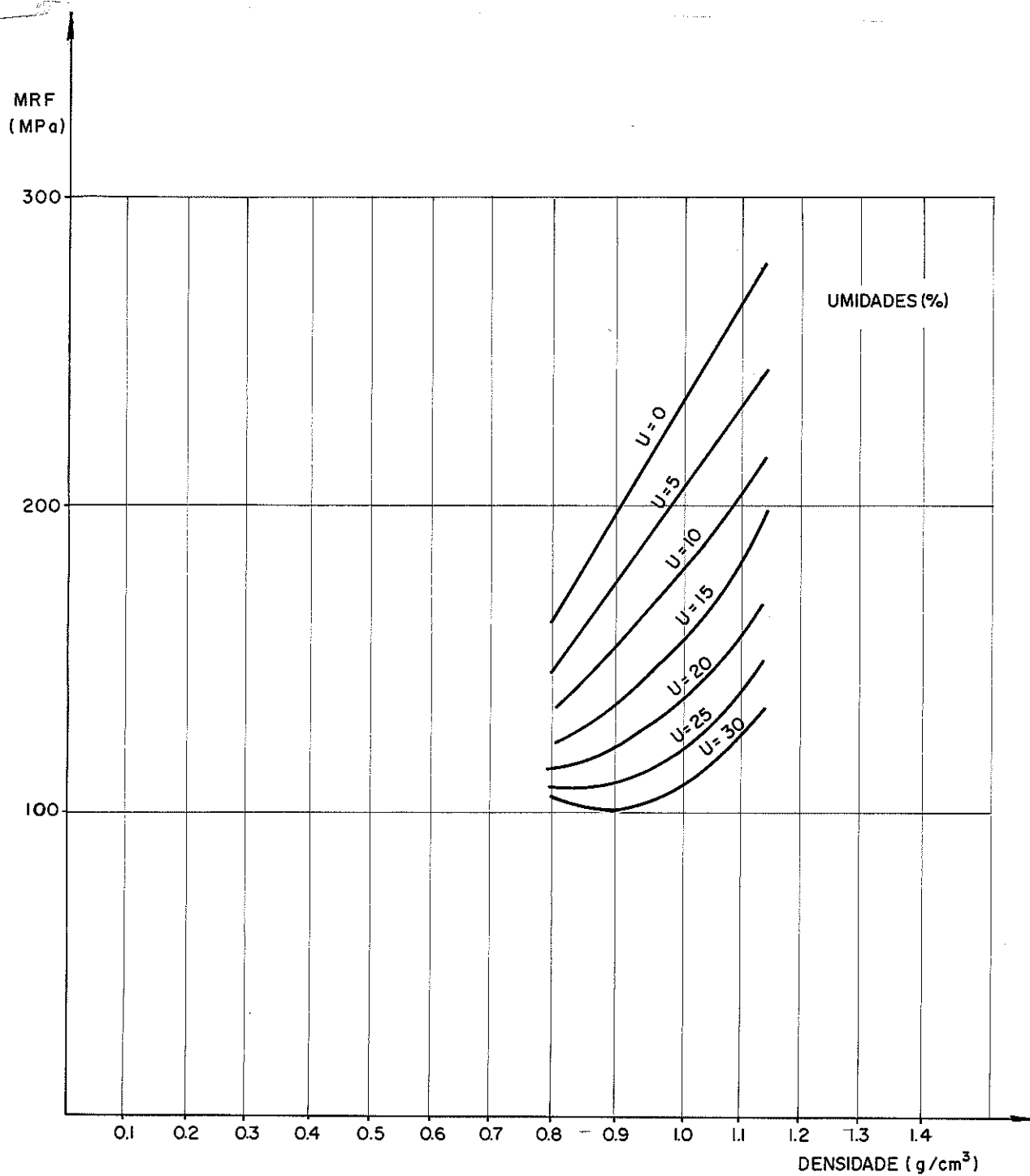


Fig. 3.7- Diagrama relacionado com a densidade e o módulo de resistência à flexão, para diversos níveis de umidade.- espécie: Jatobá.

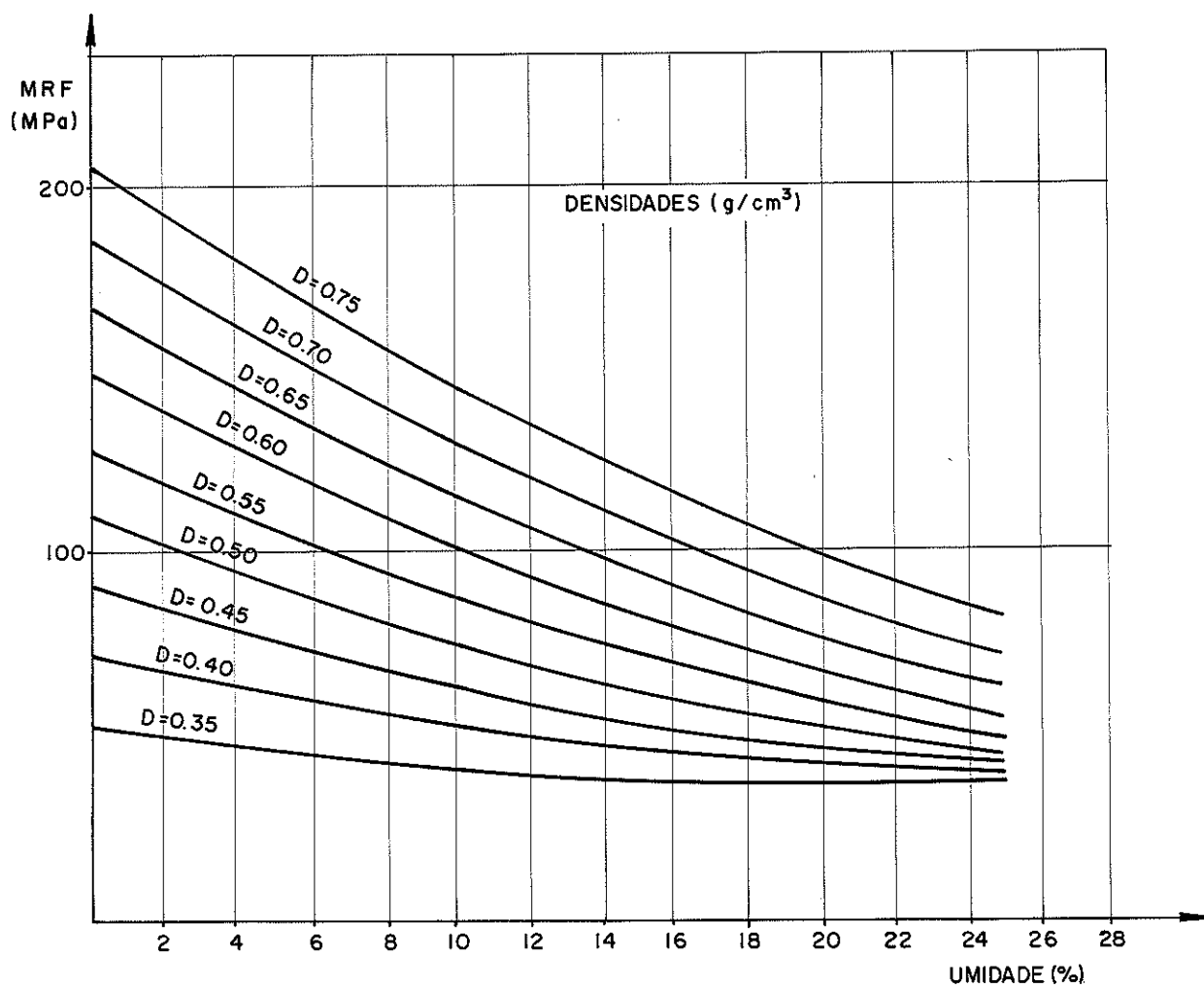


Fig. 3.8- Diagrama relacionado a umidade e módulo de resistência à flexão, para diversos níveis de densidade - espécie: Pinus Elliottii.

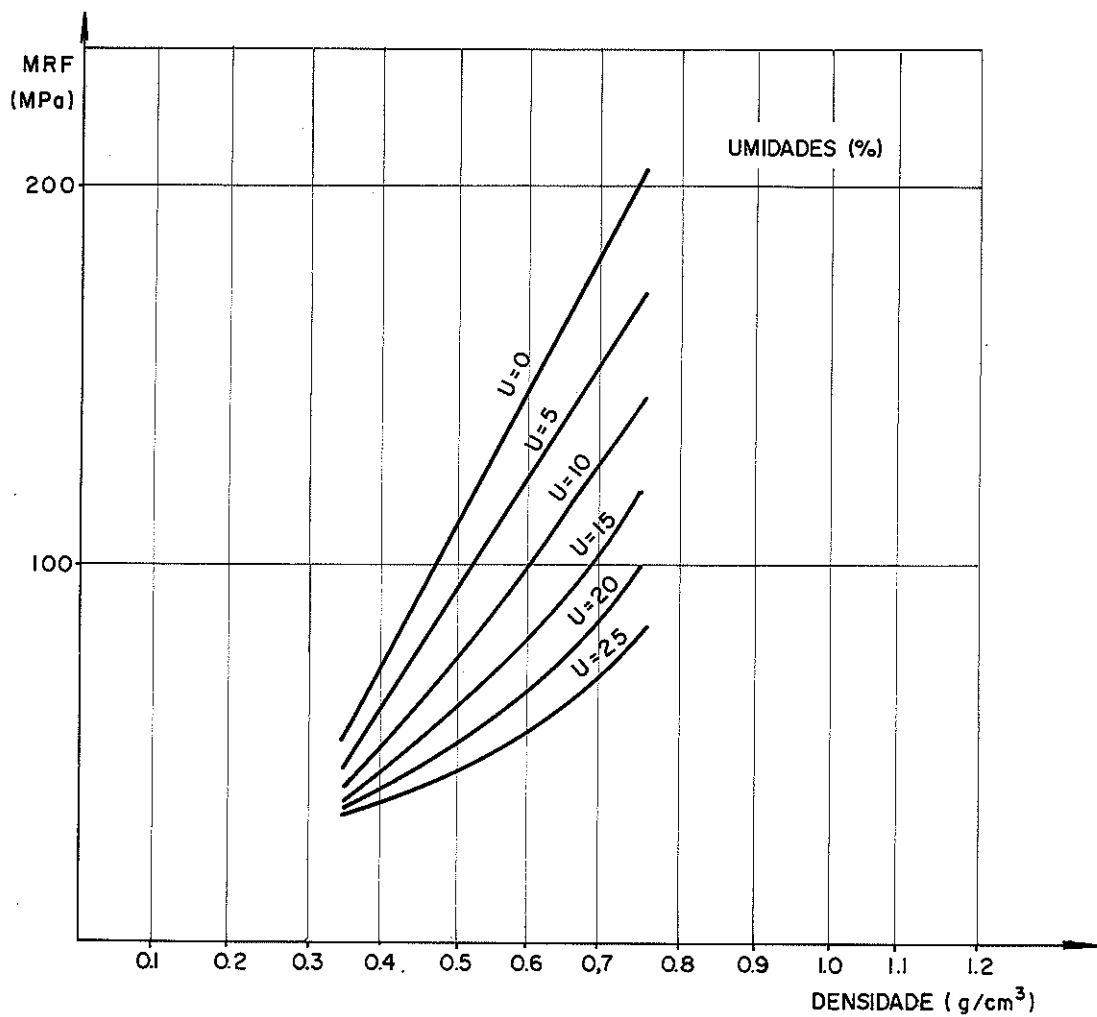


Fig. 3.9- Diagrama relacionado a densidade e o módulo de resistência à flexão, para diversos níveis de umidade - espécie: Pinus Elliotii

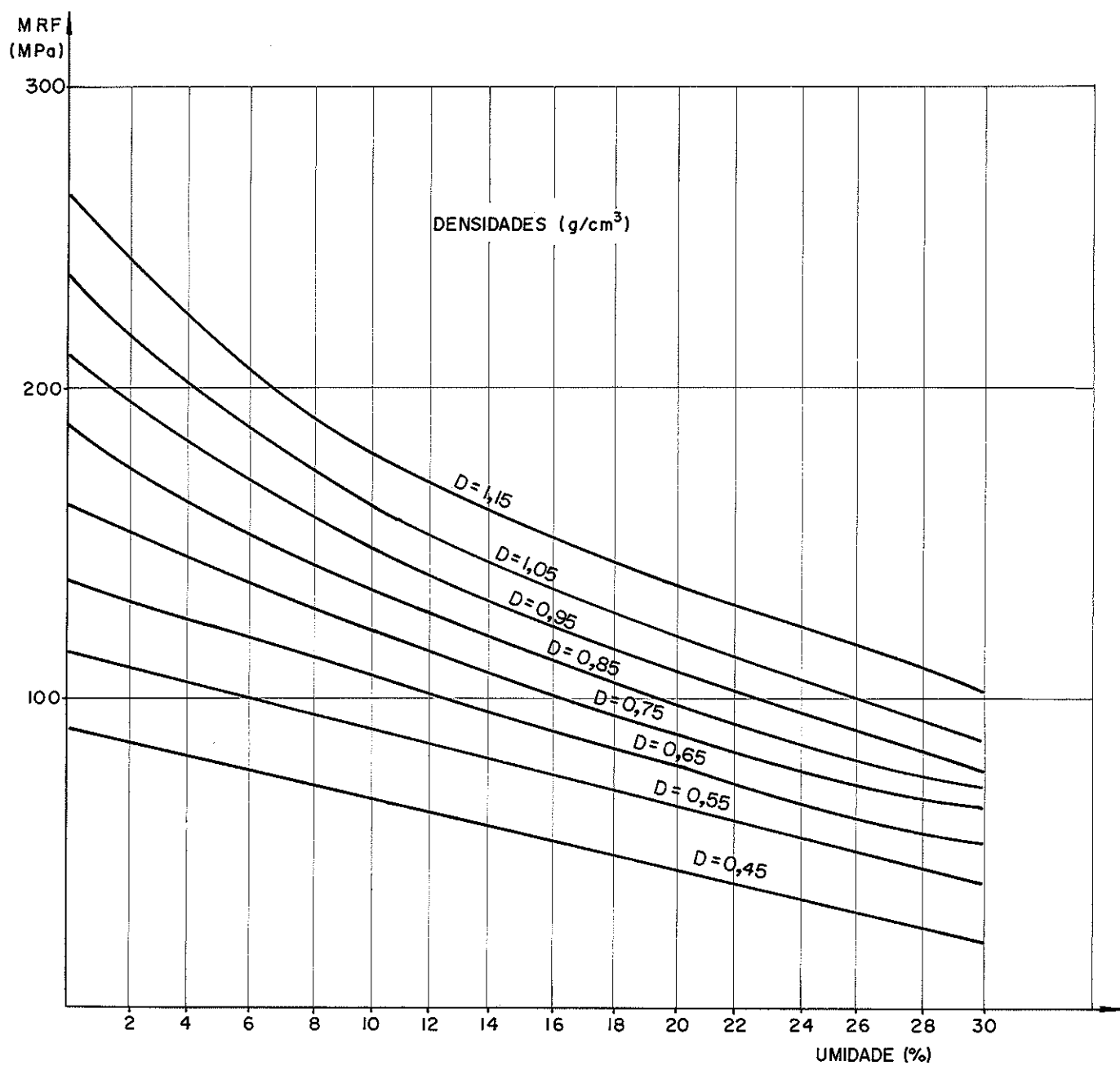


Fig. 3.10- Diagrama relacionando a umidade e o módulo de resistência à flexão, para diversos níveis de densidade - espécies: Jatobá, Eucalipto e Pinus.

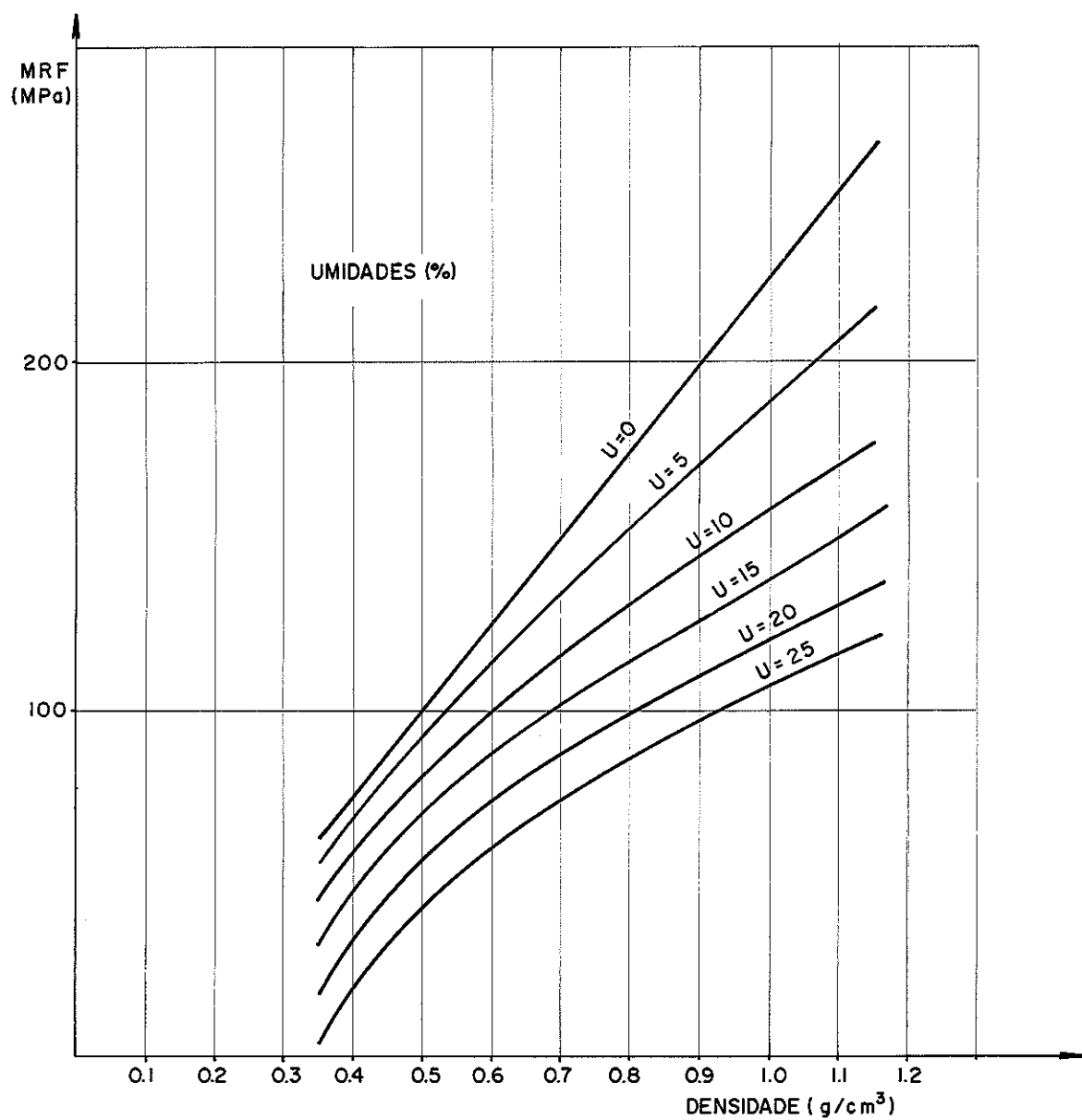


Fig. 3.11- Diagrama relacionando a densidade e o módulo de resistência à flexão, para diversos níveis de umidade - espécies: Jatobá, Eucalipto e Pinus.

3.6- COMENTÁRIOS

No desenvolvimento deste capítulo foram feitas algumas observações cujo destaque ora se procede.

De início, não pareceu razoável a verificação da variação de MRF com a umidade e a densidade da madeira com a análise por vigas. Para cada espécie, o número de doze vigas foi suficiente para se conseguir modelos estatísticos representando satisfatoriamente os resultados experimentais obtidos. Isto vai de encontro às sugestões de Hellmeister apresentadas em sua Tese de Doutorado. Além disto, a generalização dos resultados para todas as espécies em saiadas conclui de modo muito interessante a extensa pesquisa experimental conduzida. O modelo matemático admitido também se mostrou satisfatório e análise estatística realizada o confirma.

Os gráficos ao final apresentados se constituem em exce - lante ferramenta para agilizar a manipulação dos resultados, quan - do necessário, e resumem as expressões matemáticas, até certo pon - to trabalhosas, referentes aos modelos matemáticos adotados.

4- VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DA MADEIRA À FLEXÃO EM FUNÇÃO DA UMIDADE

4.1- INTRODUÇÃO

A necessidade de adequar a NBR 7190 - Norma Brasileira para o cálculo e a execução de estruturas de madeira - aos conceitos de segurança estrutural baseados em métodos semiprobabilísticos tem levado diversos pesquisadores brasileiros e, em particular, do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira, a se ocuparem dos diferentes aspectos ligados ao problema.

Especificamente, este capítulo trata de uma abordagem pioneira no contexto da pesquisa nacional a respeito de avaliação de propriedades da madeira com vistas a seu emprego em estrutura. Trata-se do estudo da variação da resistência característica à flexão com a variação da umidade.

Conforme já foi visto, é natural se esperar um aumento da resistência da madeira quando a umidade vai decrescendo, obviamente para níveis inferiores ao ponto de saturação das fibras. Todavia, ao se pensar em termos de resistência característica, é necessário considerar a dispersão dos resultados. Informações neste sentido não existem na literatura nacional.

A importância e o interesse da determinação da referida variação estão comentados no capítulo 1 deste trabalho, parecendo desnecessária sua repetição neste item.

4.2- EXPERIMENTAÇÃO REALIZADA

4.2.1- Generalidades

A variação da resistência característica à flexão com a umidade foi determinada a partir de uma série de ensaios a seguir descritos. Foram escolhidos diversos níveis de umidade (a partir do ponto de saturação das fibras) e para cada nível foram ensaiados trinta e dois corpos de prova, no mínimo. Foram aceitas as indicações de Mendes (19), Chahud e Mascia (17), a respeito deste número, bem como o fato de isto implicar a condição de que, com 95% de probabilidade, o erro relativo de estimativa do desvio padrão não supere 25%, segundo Fusco. Estas hipóteses foram conside

radas adequadas para atender os objetivos estabelecidos no trabalho.

Com trinta e dois corpos de prova, no mínimo, para cada nível de umidade, é possível encontrar, com suficiente aproximação, a distribuição de frequência dos resultados referentes à resistência à flexão, e a partir daí determinar os respectivos valores característicos e efetuar as comparações desejadas.

Mais detalhes a respeito da experimentação são apresentados a seguir.

4.2.2- Material utilizado

De acordo com as conclusões de Mascia constantes de sua dissertação de Mestrado, adotou-se o corpo de prova de dimensões nominais 2x2x30 cm, obtidos a partir de vigas de seção transversal 6x12 cm². Devido a homogeneidade do material, optou-se por ensaiar a espécie Comaru (Coumaruna alata). As vigas mencionadas foram adquiridas em diferentes épocas nas serrarias de São Carlos, por razões já expostas.

Ao total foram ensaiados 198 corpos de prova de Comaru.

4.2.3- Esquema de ensaio e equipamento empregado

Os ensaios dos corpos de prova descritos no item anterior foram realizados em Máquina Universal AMSLER, capacidade 250KN e o ensaio segue o esquema da figura 4.1 a seguir:

Legenda:

- 1 -Sistema de carregamento
- 2 -Cutelo
- 3 -Placa metálica
- 4 -Corpo de prova
- 5 -Cantoneira
- 6 -Relógio comparador de precisão 0,01 mm
- 7 -Base magnética
- 8 -Apoio móvel
- 9 -Placa de apoio
- 10-Apoio fixo

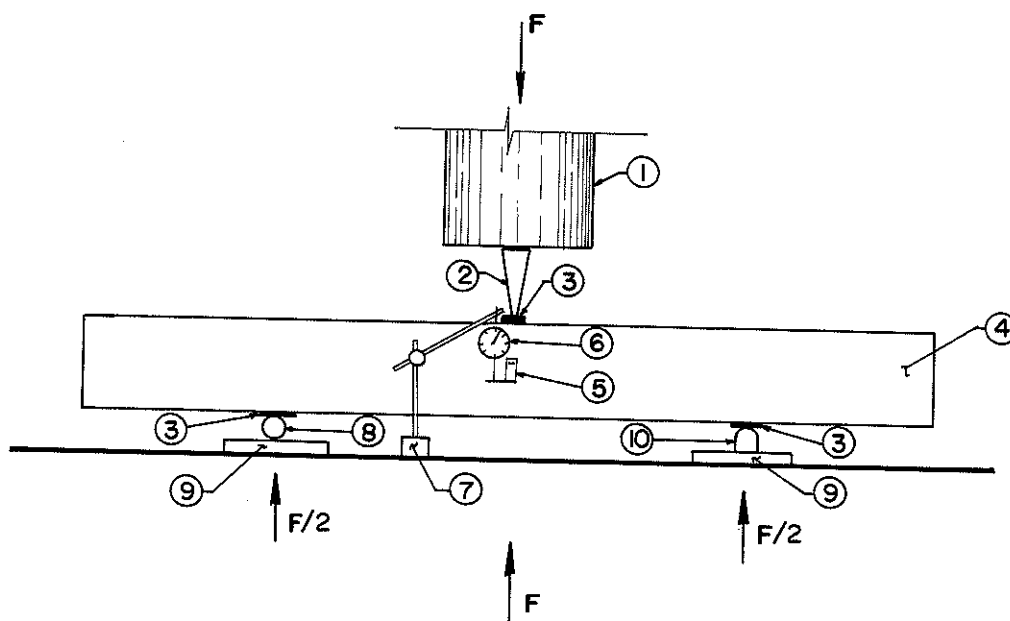
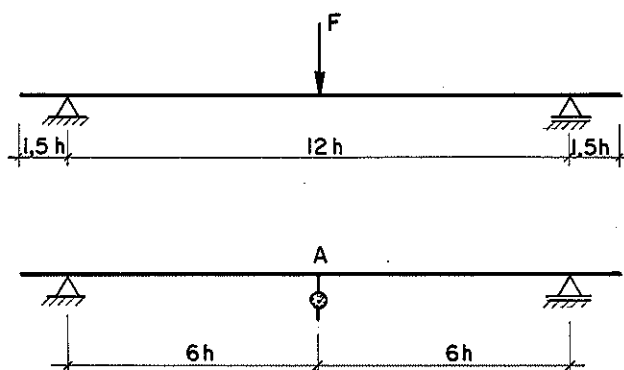


Fig. 4.1- Esquema de ensaio

A carga foi sendo aplicada e registros de deslocamentos eram feitos a cada 300N até 1200N (4 leituras), correspondendo ao trecho elástico. Retirado o relógio, a carga foi levada até a ruptura. Os registros das deformações foram feitos à vista do interesse em se fazer uma abordagem (análoga à deste capítulo) para o módulo de elasticidade da madeira à flexão.

Esquema estático e posição do relógio comparador:



O objetivo deste ensaio foi a obtenção do módulo de elasticidade e módulo de ruptura à flexão, mas os aspectos relacionados ao módulo de elasticidade só serão discutidos no capítulo 5.

O valor do módulo de ruptura à flexão foi calculado como o já descrito no item 3.2.3.

4.2.4- Velocidade de carregamento

A aplicação de carga se fez segundo a NBR 6230, item 10b, isto é, a ruptura não deve ocorrer em intervalo de tempo inferior a dois minutos.

4.2.5- Controle de umidade

O controle de umidade foi feito conforme já o descrito no item 3.2.5, apenas com a peculiaridade de se obter, para cada umidade, o número mínimo de trinta e dois corpos de prova, devido às explicações contidas no item 4.2.1.

O conjunto de corpos de prova-umidade obtido desta forma foi:

Grupo	Umidade (%)	Número de Corpos de Prova
A	12	33
B	20	32
C	8	34
D	3	32
E	16	33
F	6	34

O grupo B foi composto de corpos de prova com umidade em torno de 20%, equivalente ao ponto de saturação das fibras para a espécie Comaru, segundo a indicação do Boletim nº 31 do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

4.3- APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NA EXPERIMENTAÇÃO

Com o material utilizado, segundo a metodologia de ensaio descrito nos itens anteriores deste capítulo, foram obtidos os resultados para os parâmetros de ruptura em função da umidade.

4.3.1- Grupo A: Umidade de 12%

CP	MRF (MPa)	CP	MRF (MPa)
1	127	17	174
2	186	18	173
3	164	19	164
4	144	20	106
5	97	21	126
6	160	22	160
7	91	23	104
8	123	24	141
9	160	25	184
10	135	26	148
11	141	27	139
12	142	28	79
13	167	29	153
14	178	30	93
15	162	31	150
16	154	32	153

4.3.2- Grupo B: Umidade 20%

CP	MRF (MPa)	CP	MRF (MPa)
1	95	17	139
2	158	18	150
3	103	19	122
4	111	20	103
5	123	21	113
6	121	22	107
7	100	23	139
8	111	24	78
9	132	25	124
10	147	26	145
11	122	27	130
12	114	28	126
13	127	29	131
14	108	30	80
15	111	31	125
16	93	32	112

4.3.3- Grupo C: Umidade 8%

CP	MRF (MPa)	CP	MRF (MPa)
1	131	18	125
2	99	19	139
3	151	20	164
4	140	21	132
5	171	22	143
6	121	23	146
7	151	24	192
8	143	25	150
9	170	26	171
10	168	27	62
11	198	28	178
12	169	29	145
13	169	30	158
14	108	31	124
15	114	32	144
16	151	33	84
17	97	34	181

4.3.4- Grupo D: Umidade 3%

CP	MRF (MPa)	CP	MRF (MPa)
1	109	17	114
2	162	18	158
3	154	19	115
4	84	20	130
5	191	21	154
6	148	22	170
7	159	23	175
8	198	24	161
9	224	25	114
10	111	26	162
11	167	27	235
12	147	28	147
13	183	29	168
14	137	30	197
15	103	31	110
16	156	32	160

4.3.5- Grupo E: Umidade 16%

CP	MRF (MPa)	CP	MRF (MPa)
1	116	18	157
2	169	19	149
3	149	20	96
4	131	21	115
5	88	22	146
6	146	23	95
7	83	24	128
8	112	25	167
9	146	26	135
10	123	27	126
11	128	28	72
12	129	29	139
13	152	30	85
14	162	31	137
15	147	32	139
16	140	33	177
17	158		

4.3.6- Grupo F: Umidade 6%

CP	MRF (MPa)	CP	MRF (MPa)
1	120	18	173
2	139	19	179
3	121	20	165
4	85	21	189
5	166	22	155
6	134	23	135
7	215	24	164
8	99	25	144
9	91	26	150
10	146	27	131
11	189	28	188
12	161	29	117
13	78	30	111
14	184	31	165
15	178	32	95
16	155	33	200
17	165		

4.4- ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.4.1- Distribuição de frequência das resistências à flexão estática da madeira

Neste item é apresentado o estudo desenvolvido para a determinação da distribuição de frequência das resistências à flexão da madeira.

A partir do conjunto de resultados obtidos na experimentação, foi realizada análise estatística com o objetivo de se definir a função densidade de probabilidade mais representativa do campo amostral existente.

Este é um passo inicial para a determinação dos valores relativos à resistência característica da madeira à flexão estática.

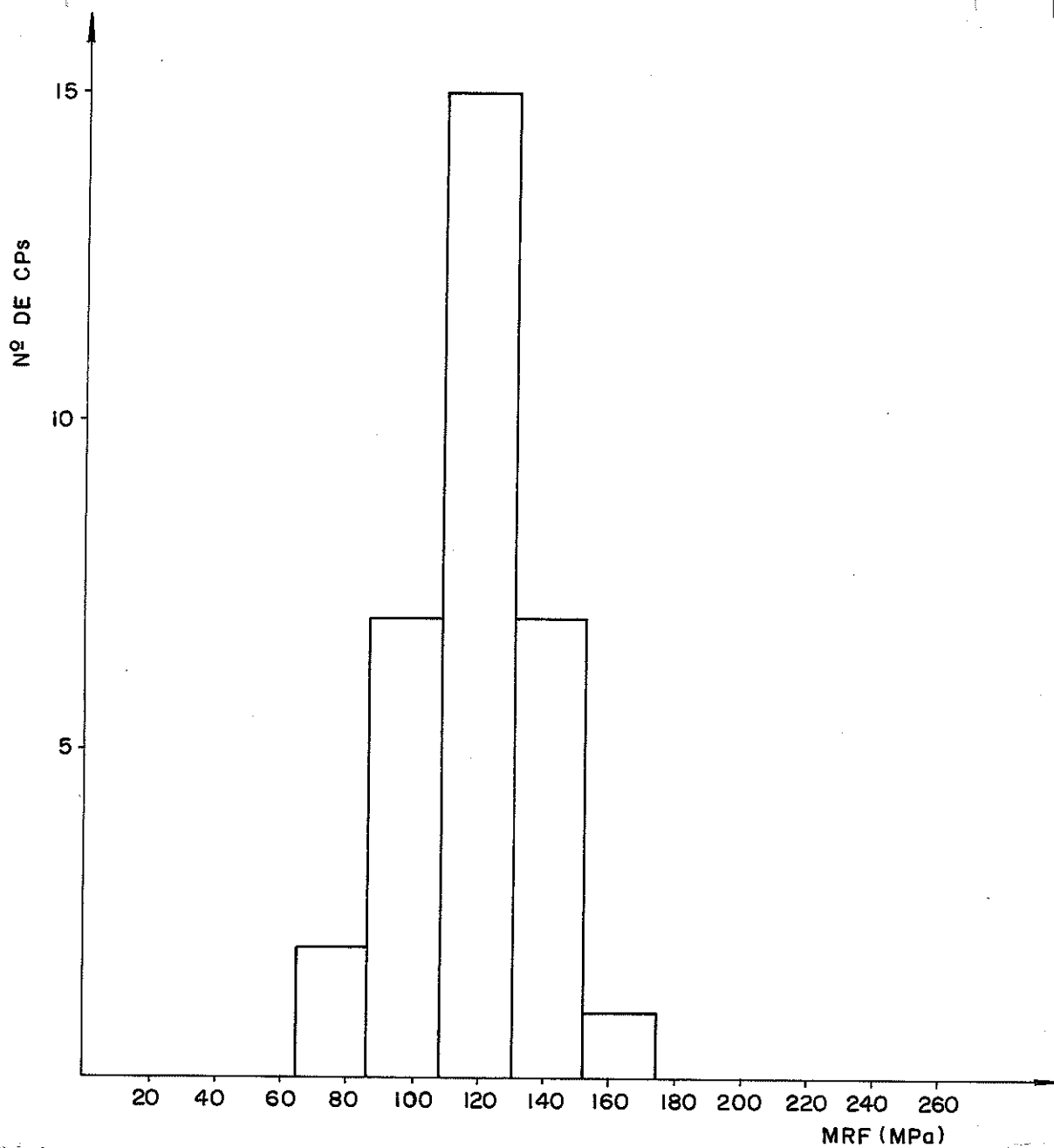
A análise se baseou em conceitos estatísticos apresentados a seguir.

4.4.1.1- Histogramas dos resultados

Os histogramas serão apresentados em ordem decrescente de umidades para que se possa analisar em item posterior a variação da dispersão existente.

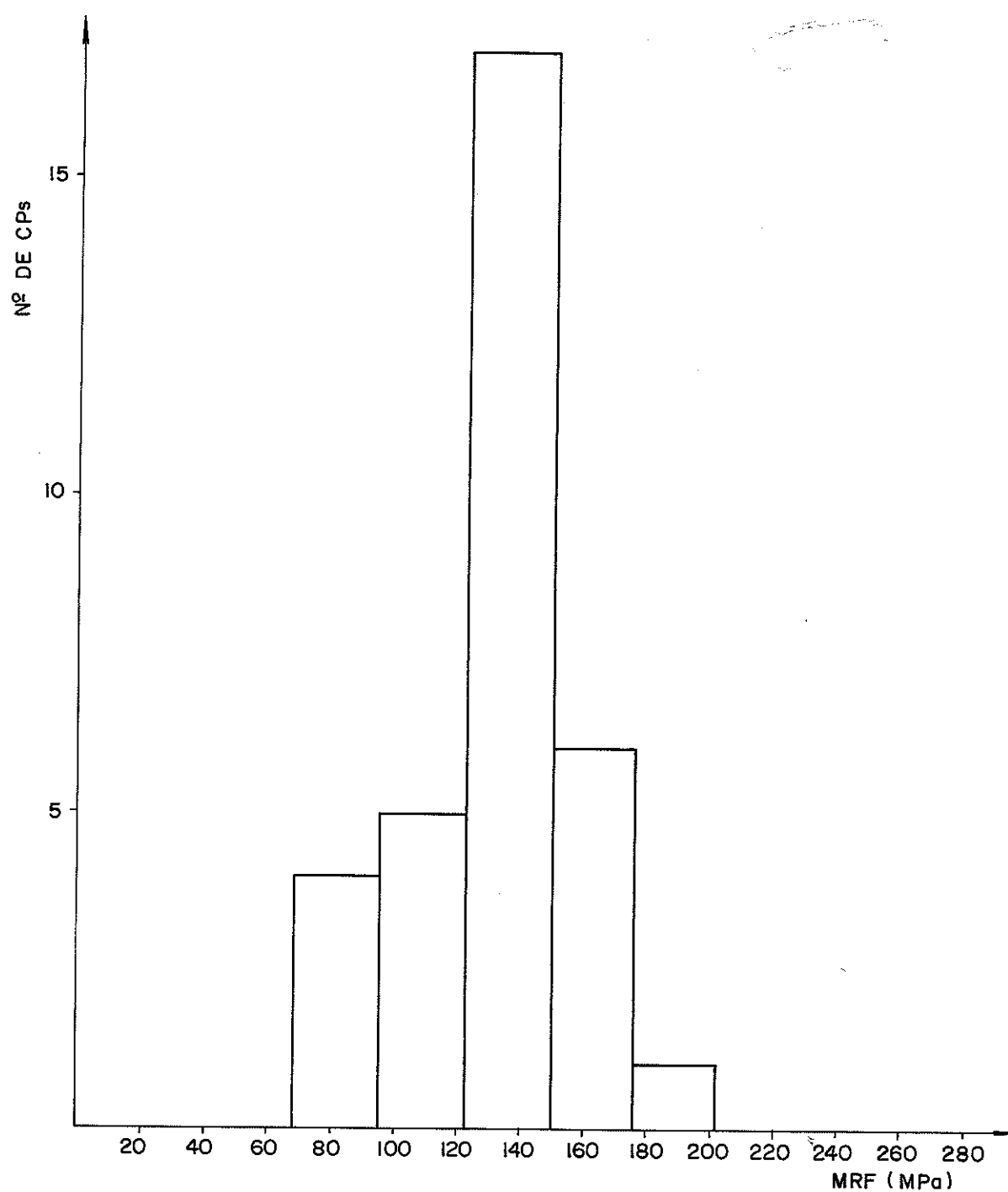
Grupo B: Umidade 20%

MRF (MPa)	nº de corpos de prova
até 86	2
87-108	7
109-130	15
131-152	7
acima de 152	1



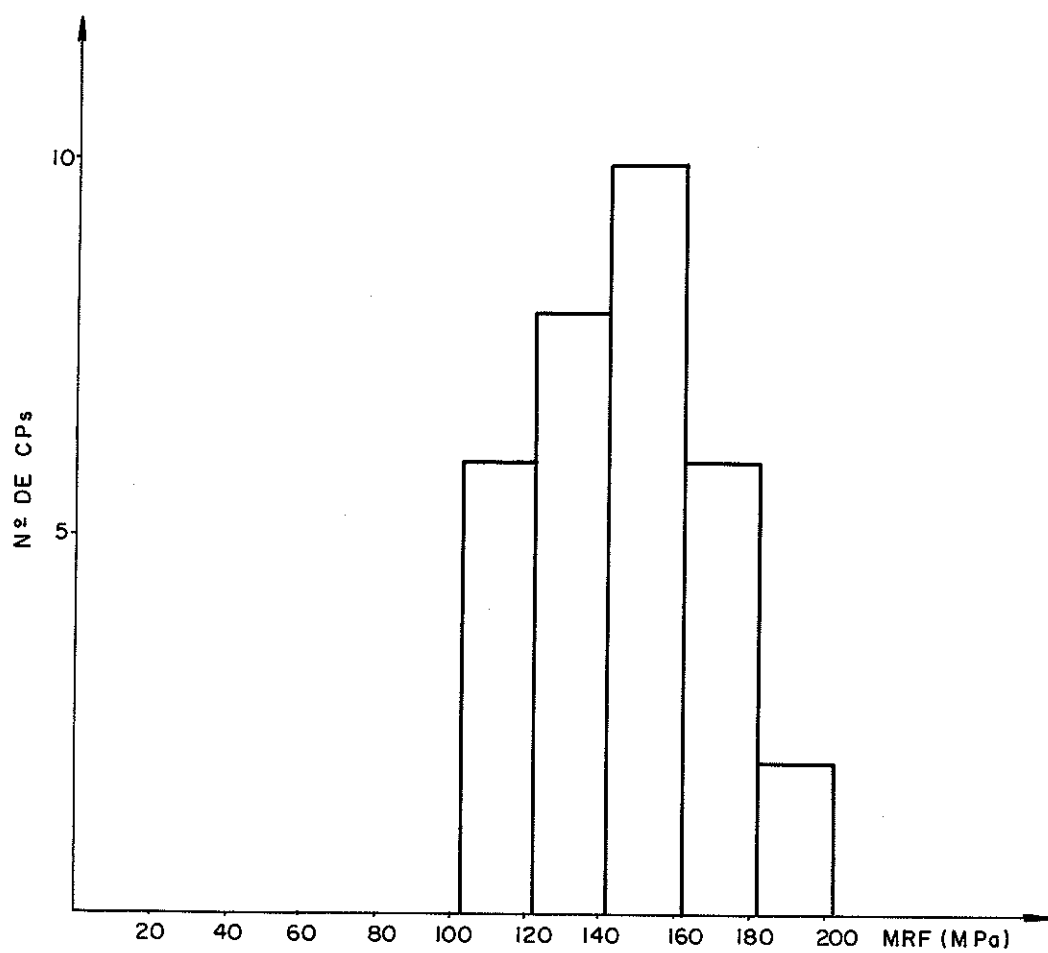
Grupo E: Umidade 16%

MRF (MPa)	nº de corpos de prova
até 94	4
95-122	5
123-149	17
150-176	6
acima de 176	1



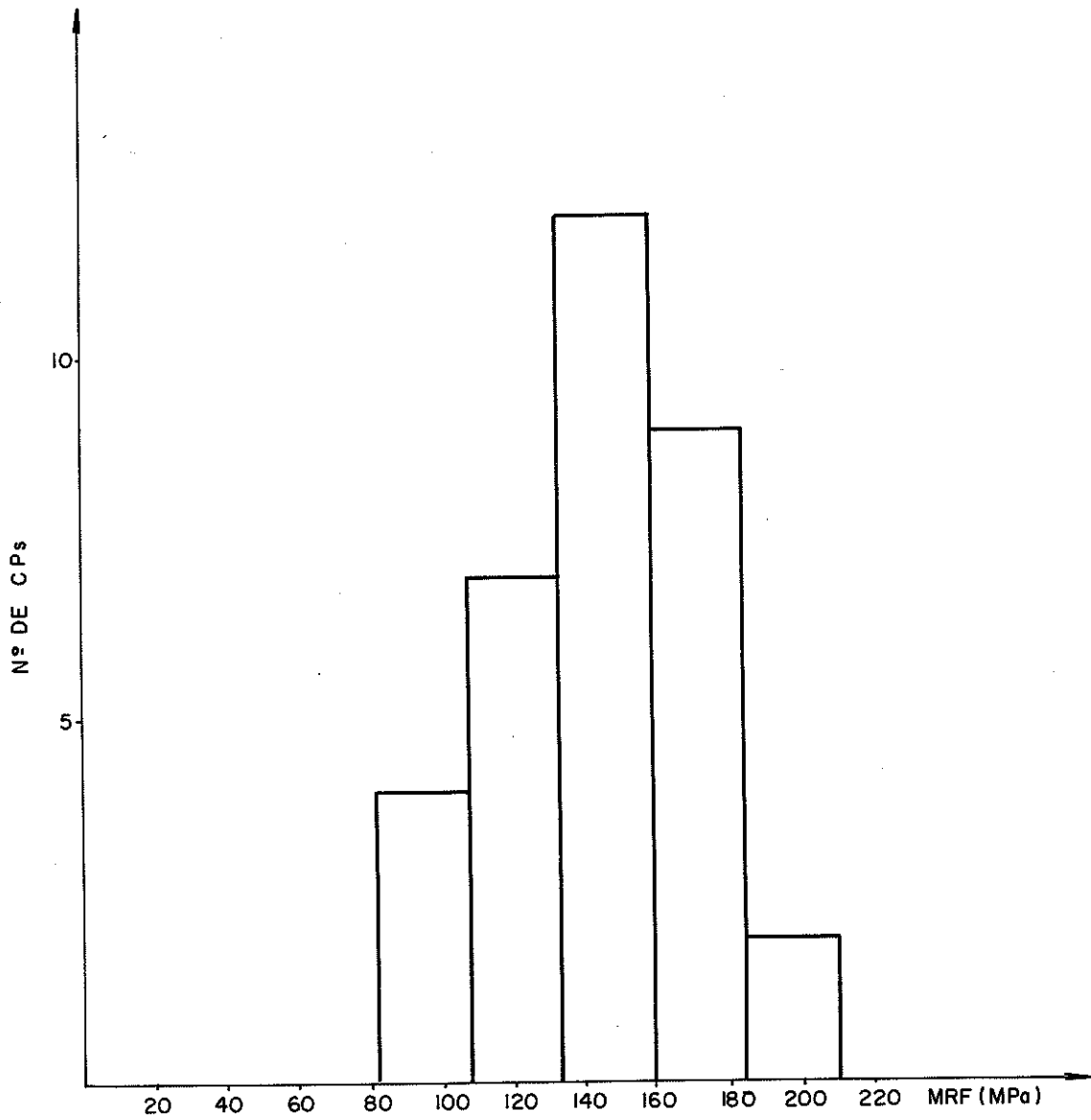
Grupo A: Umidade 12%

MRF (MPa)	nº de corpos de prova
até 122	6
123-142	8
143-162	10
163-182	6
acima de 183	2



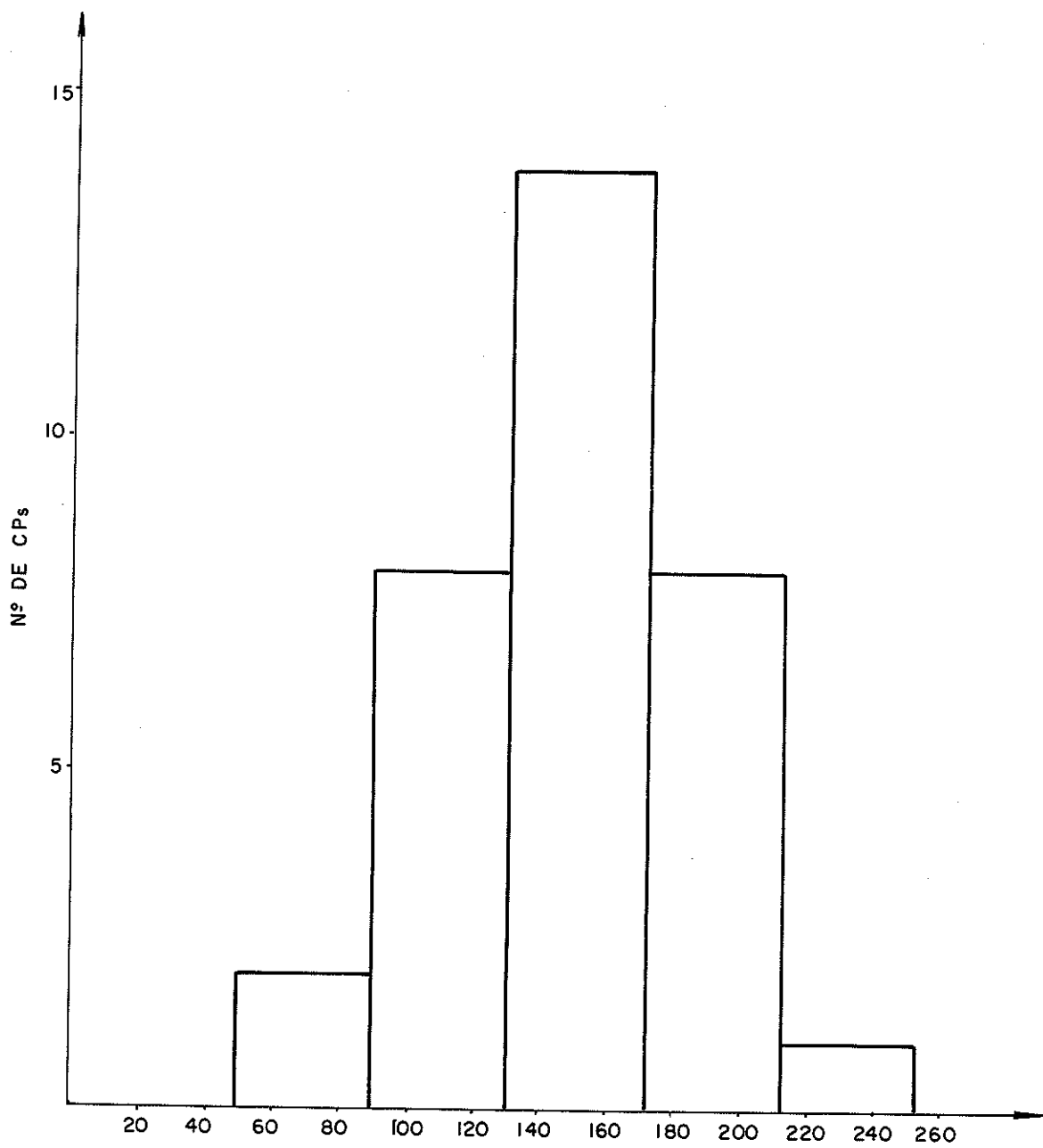
Grupo C: Umidade 8%

MRF (MPa)	nº de corpos de prova
até 107	4
108-133	7
134-159	12
160-185	9
acima de 186	2



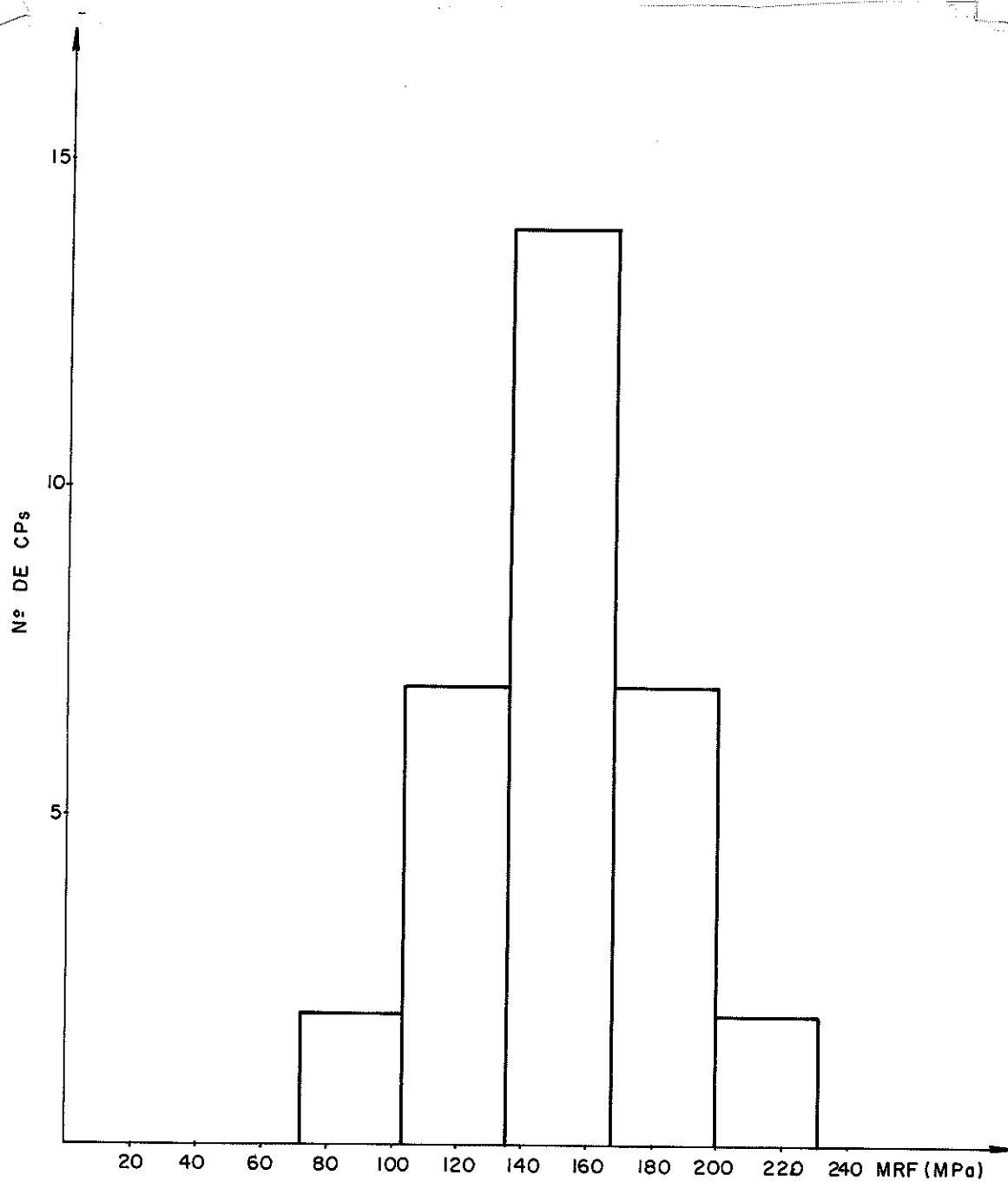
Grupo F: Umidade 6%

MRF (MPa)	nº de corpos de prova
até 90	2
91-131	8
132-172	14
173-213	8
acima de 214	1



Grupo D: Umidade 3%

MRF (MPa)	nº de corpos de prova
até 103	2
104-135	7
136-167	14
168-199	7
acima de 200	2



4.4.1.2- Distribuição normal e testes de aderência

Uma observação preliminar dos histogramas revela a aparente tendência dos resultados apresentarem distribuição normal. Para comprovar esta tendência foram feitos testes de aderência: o de Kolmogorov-Smirnov e o de Pearson, e ainda o teste de Normalidade.

Antes de serem apresentados os resultados dos testes, será feita uma breve descrição de cada um.

Teste de Kolmogorov-Smirnov

Kolmogorov e Smirnov desenvolveram um método para testar a aderência, no qual a variável de teste é maior diferença entre a função de distribuição acumulada do modelo testado e o da amostra.

Esta diferença é representada por:

$$d = \text{m\`ax} |F(x) - G(x)| \dots\dots\dots (4.1)$$

onde: $F(x) = P(x < Z)$ é a função de distribuição acumulada do modelo testado e $G(x)$ é a função de distribuição acumulada da amostra.

O teste consiste basicamente em fazer a comparação do valor d com um valor crítico (d_{crit}), tratado em função do número de elementos da amostra e do nível de significância α . Se $d < d_{\text{crit}}$, não se rejeita a hipótese de aderência entre as distribuições com paradas (H_0).

No caso deste trabalho admitiu-se $\alpha = 5\%$, com base nos autores mencionados: Mendes, Chahud e Mascia.

Teste de aderência de Pearson

Karl Pearson, 1900, apresentou o teste de aderência que, em linhas gerais, consiste em se calcular a estatística D^2 , sendo:

$$D^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \dots\dots\dots (4.2)$$

onde: k = número de intervalos

n = número total de resultados da amostra

n_i = frequência do intervalo A_i

p_i = probabilidade da variável estar contida no intervalo A_i

Para a determinação do número de intervalos, pode ser adotada a sugestão de Benjamin e Cornell, 1970:

$$K = 1 + 3,3 \log n$$

Por hipótese, quando n é grande, D^2 segue uma distribuição qui-quadrado. D^2 deve ser comparado com um valor C , obtido da tabela do qui-quadrado com $r = k-1-p$ graus de liberdade (onde p é número de parâmetros estimados, no caso, $p = 2$ pois foram estimados a média e o desvio padrão) e com nível de segurança desejado.

Se $D^2 > C$, rejeita-se a hipótese da distribuição tender à normal (H_0).

Teste de Normalidade

Este teste dá idéia da normalidade de um conjunto de observações, ou seja, de uma amostra.

O teste consiste basicamente em analisar um gráfico no qual são plotados os resultados observados contra os valores normalizados pela função NSCORE implementada nos conjuntos de microcomputadores disponíveis no LaMEM.

A hipótese de normalidade se justifica pelo aspecto linear do gráfico, com um coeficiente de correlação linear (R^2) próximo de 1.

4.4.1.2.1- Resultados obtidos da aplicação do teste de Kolmogorov-Smirnov

Os resultados foram obtidos por meio de programa específico no microcomputador EXATO-pró (MC-4000) disponível no LaMEM.

O teste foi aplicado para cada um dos grupos estudados e os resultados são apresentados a seguir.

Grupo A

TESTE DE ADERENCIA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

X(*)	Z(*)	F(*)	G(*)	E(*)	D(*)
			0.00000		
79	-2.25417	0.01220	0.03125	0.01220	0.01905
91	-1.83192	0.03360	0.06250	0.00235	0.02890
93	-1.76155	0.03920	0.09375	0.02330	0.05455
97	-1.62080	0.05260	0.12500	0.04115	0.07240
104	-1.37449	0.08530	0.15625	0.03970	0.07095
106	-1.30412	0.09680	0.18750	0.05945	0.09070
123	-0.70594	0.23890	0.21875	0.05140	0.02015
126	-0.60038	0.27430	0.25000	0.05555	0.02430
127	-0.56519	0.28430	0.28125	0.03430	0.00305
133	-0.28370	0.38970	0.31250	0.10845	0.07720
139	-0.14295	0.44430	0.34375	0.13180	0.10055
141	-0.07257	0.47210	0.37500	0.12835	0.09710
141	-0.07257	0.47210	0.40625	0.09710	0.06585
142	-0.03739	0.48400	0.43750	0.07775	0.04650
144	0.03299	0.51200	0.46875	0.07450	0.04325
148	0.17374	0.56750	0.50000	0.09875	0.06750
150	0.24411	0.59480	0.53125	0.09480	0.06355
153	0.34967	0.63680	0.56250	0.10555	0.07430
153	0.34967	0.63680	0.59375	0.07430	0.04305
154	0.38486	0.64800	0.62500	0.05425	0.02300
160	0.59598	0.72570	0.65625	0.10070	0.06945
160	0.59598	0.72570	0.68750	0.06945	0.03820
160	0.59598	0.72570	0.71875	0.03820	0.00695
162	0.66635	0.74860	0.75000	0.02985	0.00140
164	0.73673	0.77030	0.78125	0.02030	0.01095
164	0.73673	0.77030	0.81250	0.01095	0.04220
167	0.84229	0.79950	0.84375	0.01300	0.04425
173	1.05341	0.85310	0.87500	0.00935	0.02190
174	1.08860	0.86210	0.90625	0.01290	0.04415
178	1.22935	0.89070	0.93750	0.01555	0.04680
184	1.44047	0.92510	0.96875	0.01240	0.04365
186	1.51084	0.93450	1.00000	0.03425	0.06550

MAXIMO VALOR ENTRE E(*) E D(*)= .1318

A HIPOTESE DE DISTRIBUICAO NORMAL NAO PODE SER REJEITADA

Grupo B

TESTE DE ADERENCIA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

X(*)	Z(*)	F(*)	G(*)	E(*)	D(*)
			0.00000		
78	-2.13626	0.01620	0.03125	0.01620	0.01505
80	-2.03141	0.02120	0.06250	0.01005	0.04130
93	-1.34991	0.08850	0.09375	0.02600	0.00525
95	-1.24506	0.10560	0.12500	0.01185	0.01940
100	-0.98294	0.16350	0.15625	0.03850	0.00725
103	-0.82567	0.20330	0.18750	0.04705	0.01580
103	-0.82567	0.20330	0.21875	0.01580	0.01545
107	-0.61598	0.26760	0.25000	0.04885	0.01760
108	-0.56355	0.28770	0.28125	0.03770	0.00645
111	-0.40628	0.34090	0.31250	0.05965	0.02840
111	-0.40628	0.34090	0.34375	0.02840	0.00285
111	-0.40628	0.34090	0.37500	0.00285	0.03410
112	-0.35386	0.36320	0.40625	0.01180	0.04305
113	-0.30144	0.38210	0.43750	0.02415	0.05340
114	-0.24901	0.40130	0.46875	0.03620	0.06745
121	0.11795	0.54780	0.50000	0.07905	0.04780
122	0.17038	0.56750	0.53125	0.06750	0.03625
122	0.17038	0.56750	0.56250	0.03625	0.00500
123	0.22280	0.58710	0.59375	0.02460	0.00665
124	0.27522	0.61030	0.62500	0.01655	0.01470
125	0.32765	0.62930	0.65625	0.00430	0.02695
126	0.38007	0.64800	0.68750	0.00825	0.03950
127	0.43249	0.66640	0.71875	0.02110	0.05235
130	0.58976	0.72240	0.75000	0.00365	0.02760
131	0.64219	0.73890	0.78125	0.01110	0.04235
132	0.69461	0.75490	0.81250	0.02635	0.05760
139	1.06158	0.85540	0.84375	0.04290	0.01165
139	1.06158	0.85540	0.87500	0.01165	0.01960
145	1.37612	0.91620	0.90625	0.04120	0.00995
147	1.48096	0.93060	0.93750	0.02435	0.00690
150	1.63824	0.94950	0.96875	0.01200	0.01925
158	2.05762	0.98030	1.00000	0.01155	0.01970

MAXIMO VALOR ENTRE E(*) E D(*)= .0790499

A HIPOTESE DE DISTRIBUICAO NORMAL NAO PODE SER REJEITADA

Grupo C

TESTE DE ADERENCIA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

TESTE DE ADERENCIA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

X(*)	Z(*)	F(*)	G(*)	E(*)	D(*)
			0.00000		
62	-2.67354	0.00380	0.02941	0.00380	0.02561
84	-1.95445	0.02560	0.05882	0.00381	0.03322
97	-1.52952	0.06300	0.08824	0.00418	0.02524
99	-1.46415	0.07220	0.11765	0.01604	0.04545
108	-1.16998	0.12100	0.14706	0.00335	0.02606
114	-0.97386	0.16600	0.17647	0.01894	0.01047
121	-0.74505	0.22660	0.20588	0.05013	0.02072
124	-0.64700	0.25780	0.23529	0.05192	0.02251
125	-0.61431	0.27090	0.26471	0.03561	0.00619
131	-0.41819	0.33720	0.29412	0.07249	0.04308
132	-0.38551	0.34830	0.32353	0.05418	0.02477
139	-0.15670	0.43640	0.35294	0.11287	0.08346
140	-0.12402	0.45220	0.38235	0.09926	0.06985
143	-0.02596	0.48800	0.41176	0.10565	0.07624
143	-0.02596	0.48800	0.44118	0.07624	0.04682
144	0.00673	0.50400	0.47059	0.06282	0.03341
145	0.03942	0.51600	0.50000	0.04541	0.01600
146	0.07210	0.52790	0.52941	0.02790	0.00151
150	0.20285	0.57930	0.55882	0.04989	0.02048
151	0.23553	0.59480	0.58824	0.03598	0.00656
151	0.23553	0.59480	0.61765	0.00656	0.02285
151	0.23553	0.59480	0.64706	0.02285	0.05226
158	0.46434	0.67720	0.67647	0.03014	0.00073
164	0.66045	0.74540	0.70588	0.06893	0.03952
168	0.79120	0.78520	0.73529	0.07932	0.04991
169	0.82389	0.79390	0.76471	0.05861	0.02919
169	0.82389	0.79390	0.79412	0.02919	0.00022
170	0.85657	0.80510	0.82353	0.01098	0.01843
171	0.88926	0.81330	0.85294	0.01023	0.03964
171	0.88926	0.81330	0.88235	0.03964	0.06905
178	1.11806	0.86860	0.91176	0.01375	0.04316
181	1.21612	0.88880	0.94118	0.02296	0.05238
192	1.57567	0.94300	0.97059	0.00182	0.02759
198	1.77179	0.96160	1.00000	0.00899	0.03840

MAXIMO VALOR ENTRE E(*) E D(*)= .112871

A HIPOTESE DE DISTRIBUICAO NORMAL NAO PODE SER REJEITADA

Grupo D

TESTE DE ADERENCIA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

X(*)	Z(*)	F(*)	B(*)	E(*)	D(*)
			0.00000		
84	-1.98258	0.02380	0.03125	0.02380	0.00745
103	-1.43838	0.07490	0.06250	0.04365	0.01240
109	-1.26652	0.10200	0.09375	0.03950	0.00825
110	-1.23788	0.10750	0.12500	0.01375	0.01750
111	-1.20924	0.11310	0.15625	0.01190	0.04315
114	-1.12331	0.13140	0.18750	0.02485	0.05610
114	-1.12331	0.13140	0.21875	0.05610	0.08735
115	-1.09467	0.13790	0.25000	0.08085	0.11210
130	-0.66504	0.25140	0.28125	0.00140	0.02985
137	-0.46454	0.32280	0.31250	0.04155	0.01030
147	-0.17812	0.42860	0.34375	0.11610	0.08485
147	-0.17812	0.42860	0.37500	0.08485	0.05360
148	-0.14948	0.44040	0.40625	0.06540	0.03415
154	0.02238	0.50800	0.43750	0.10175	0.07050
154	0.02238	0.50800	0.46875	0.07050	0.03925
156	0.07966	0.53190	0.50000	0.06315	0.03190
158	0.13695	0.55570	0.53125	0.05570	0.02445
159	0.16559	0.56750	0.56250	0.03625	0.00500
160	0.19423	0.57530	0.59375	0.01280	0.01845
161	0.22287	0.58710	0.62500	0.00665	0.03790
162	0.25151	0.59870	0.65625	0.02630	0.05755
162	0.25151	0.59870	0.68750	0.05755	0.08880
167	0.39473	0.65170	0.71875	0.03580	0.06705
168	0.42337	0.66280	0.75000	0.05595	0.08720
170	0.48065	0.68440	0.78125	0.06560	0.09685
175	0.62386	0.73240	0.81250	0.04885	0.08010
183	0.85300	0.80230	0.84375	0.01020	0.04145
191	1.08214	0.85990	0.87500	0.01615	0.01510
197	1.25399	0.89440	0.90625	0.01940	0.01185
198	1.28264	0.89970	0.93750	0.00655	0.03780
224	2.02733	0.97880	0.96875	0.04130	0.01005
235	2.34240	0.99040	1.00000	0.02165	0.00960

MAXIMO VALOR ENTRE E(*) E D(*)= .1161

A HIPOTESE DE DISTRIBUICAO NORMAL NAO PODE SER REJEITADA

Grupo E

TESTE DE ADERENCIA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

X(*)	Z(*)	F(*)	G(*)	E(*)	D(*)
			0.00000		
72	-2.23603	0.01260	0.03030	0.01260	0.01770
83	-1.82317	0.03440	0.06061	0.00410	0.02621
85	-1.74811	0.04010	0.09091	0.02051	0.05081
88	-1.63551	0.05050	0.12121	0.04041	0.07071
95	-1.37278	0.08530	0.15152	0.03591	0.06622
96	-1.33525	0.09010	0.18182	0.06142	0.09172
112	-0.73473	0.23270	0.21212	0.05088	0.02058
115	-0.62213	0.26760	0.24242	0.05548	0.02518
116	-0.58460	0.28100	0.27273	0.03858	0.00827
123	-0.32187	0.37450	0.30303	0.10177	0.07147
126	-0.20927	0.41680	0.33333	0.11377	0.08347
128	-0.13421	0.44830	0.36364	0.11497	0.08466
128	-0.13421	0.44830	0.39394	0.08466	0.05436
129	-0.09667	0.46020	0.42424	0.06626	0.03596
131	-0.02161	0.49200	0.45455	0.06776	0.03746
135	0.12852	0.53170	0.48485	0.09715	0.06685
137	0.20359	0.57930	0.51515	0.09445	0.06415
139	0.27865	0.61030	0.54545	0.09515	0.06485
139	0.27865	0.61030	0.57576	0.06485	0.03454
140	0.31616	0.62550	0.60606	0.04974	0.01944
146	0.54138	0.70540	0.63636	0.09934	0.06904
146	0.54138	0.70540	0.66667	0.06904	0.03873
146	0.54138	0.70540	0.69697	0.03873	0.00843
147	0.57891	0.71900	0.72727	0.02203	0.00827
149	0.65398	0.74220	0.75758	0.01493	0.01538
149	0.65398	0.74220	0.78788	0.01538	0.04568
152	0.76657	0.77940	0.81818	0.00848	0.03878
157	0.95424	0.82890	0.84848	0.01072	0.01958
158	0.99177	0.83890	0.87879	0.00958	0.03989
162	1.14190	0.87290	0.90909	0.00589	0.03619
167	1.32956	0.90820	0.93939	0.00089	0.03119
169	1.40463	0.91920	0.96970	0.02019	0.05050
177	1.70469	0.95540	1.00000	0.01430	0.04460

MAXIMO VALOR ENTRE E(*) E D(*)= .114967

A HIPOTESE DE DISTRIBUICAO NORMAL NAO PODE SER REJEITADA

Grupo F

TESTE DE ADERENCIA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

X(*)	Z(*)	F(*)	G(*)	E(*)	D(*)
			0.00000		
78	-1.99294	0.02330	0.03030	0.02330	0.00700
85	-1.79391	0.03670	0.06061	0.00640	0.02391
91	-1.62331	0.05260	0.09091	0.00801	0.03831
95	-1.50957	0.06550	0.12121	0.02541	0.05571
99	-1.39584	0.08080	0.15152	0.04041	0.07072
111	-1.05463	0.14690	0.18182	0.00462	0.03492
117	-0.88403	0.18940	0.21212	0.00758	0.02272
120	-0.79873	0.21190	0.24242	0.00022	0.03052
121	-0.77029	0.22060	0.27273	0.02182	0.05213
131	-0.48596	0.31210	0.30303	0.03937	0.00907
134	-0.40066	0.34460	0.33333	0.04157	0.01127
135	-0.37222	0.35570	0.36364	0.02237	0.00794
139	-0.25849	0.39740	0.39394	0.03376	0.00346
144	-0.11632	0.45220	0.42424	0.05826	0.02796
146	-0.05945	0.47610	0.45455	0.05186	0.02155
150	0.05428	0.51990	0.48485	0.06535	0.03505
155	0.19645	0.57930	0.51515	0.09445	0.06415
155	0.19645	0.57930	0.54545	0.06415	0.03385
161	0.36705	0.64430	0.57576	0.09885	0.06854
164	0.45235	0.67360	0.60606	0.09784	0.06754
165	0.48079	0.68440	0.63636	0.07834	0.04804
165	0.48079	0.68440	0.66667	0.04804	0.01773
165	0.48079	0.68440	0.69697	0.01773	0.01257
166	0.50922	0.69500	0.72727	0.00197	0.03227
173	0.70826	0.76110	0.75758	0.03383	0.00352
178	0.85043	0.80230	0.78788	0.04472	0.01442
179	0.87886	0.81060	0.81818	0.02272	0.00758
184	1.02103	0.84610	0.84848	0.02792	0.00238
188	1.13476	0.87080	0.87879	0.02232	0.00799
189	1.16320	0.87700	0.90909	0.00179	0.03209
189	1.16320	0.87700	0.93939	0.03209	0.06239
200	1.47597	0.93060	0.96970	0.00879	0.03910
215	1.90247	0.97130	1.00000	0.00160	0.02870

MAXIMO VALOR ENTRE E(*) E D(*)= .0988454

A HIPOTESE DE DISTRIBUICAO NORMAL NAO PODE SER REJEITADA

4.4.1.2.2- Resultados obtidos da aplicação do teste de aderência de Pearson

A seguir é apresentado o teste de aderência de Pearson para cada grupo.

GRUPO A

Intervalos de Classe e Frequência de Resultados

A1:	$x \leq 122 \rightarrow n1 = 6$
A2:	$122 < x \leq 141 \rightarrow n2 = 7$
A3:	$141 < x \leq 160 \rightarrow n3 = 10$
A4:	$160 < x \leq 179 \rightarrow n4 = 7$
A5:	$x > 179 \rightarrow n5 = 2$

Com a média dos resultados $\bar{X} = 143$ MPa, o desvio padrão $s = 28,4$ MPa e auxílio da tabela de distribuição normal são calculados as probabilidades:

Cálculo das Probabilidades

$P1 = P(x \leq 122)$	$= 0,2297$
$P2 = P(122 < x \leq 141)$	$= 0,2424$
$P3 = P(141 < x \leq 160)$	$= 0,2536$
$P4 = P(160 < x \leq 179)$	$= 0,1723$
$P5 = P(x > 179)$	$= 0,102$

Através da expressão (4.2) obtém-se o valor de D^2

$$D^2 = 1,65$$

Adotando-se o nível de significância $\alpha = 5\%$, com $r = 2$ graus de liberdade, tem-se da tabela de qui-quadrado, a constante $C = 5,99$.

Com $D^2 < C$ não se rejeita a hipótese de distribuição normal de MRF.

GRUPO BIntervalos de Classe e Frequência de Resultados

A1:	$x \leq 93$	$\rightarrow n1 = 3$
A2:	$93 < x \leq 107$	$\rightarrow n2 = 5$
A3:	$107 < x \leq 120$	$\rightarrow n3 = 7$
A4:	$120 < x \leq 133$	$\rightarrow n4 = 11$
A5:	$133 < x \leq 147$	$\rightarrow n5 = 4$
A6:	$x > 147$	$\rightarrow n6 = 2$

Com a média $\bar{X} = 118$ MPa, o desvio padrão $s = 19,1$ MPa e auxílio da tabela de distribuição normal são calculados as probabilidades:

Cálculo das Probabilidades

$P1 = P (x \leq 93)$	$= 0,0951$
$P2 = P (93 < x \leq 107)$	$= 0,1859$
$P3 = P (107 < x \leq 120)$	$= 0,2588$
$P4 = P (120 < x \leq 133)$	$= 0,2454$
$P5 = P (133 < x \leq 147)$	$= 0,1505$
$P6 = P (x > 147)$	$= 0,0643$

Através da expressão (4.2) obtém-se o valor de D^2

$$D^2 = 1,75$$

Adotando-se nível de significância $\alpha = 5\%$, com $r=3$ graus de liberdade, tem-se da tabela de qui-quadrado, a constante $C=7,81$.

Como $D^2 < C$ não se rejeita a hipótese de distribuição normal de MRF.

GRUPO CIntervalos de Classe e Frequência de Resultados

A1:	$x \leq 86 \rightarrow n1 = 2$
A2:	$86 < x \leq 109 \rightarrow n2 = 3$
A3:	$109 < x \leq 132 \rightarrow n3 = 6$
A4:	$132 < x \leq 155 \rightarrow n4 = 11$
A5:	$155 < x \leq 178 \rightarrow n5 = 9$
A6:	$x > 178 \rightarrow n6 = 3$

Com a média $\bar{X} = 144$ MPa, o desvio padrão $s = 30,6$ MPa e auxílio da tabela de distribuição normal são calculados as probabilidades:

Cálculo das Probabilidades

P1 = P (x ≤ 86)	= 0,0287
P2 = P (86 < x ≤ 109)	= 0,0984
P3 = P (109 < x ≤ 132)	= 0,2212
P4 = P (132 < x ≤ 155)	= 0,2923
P5 = P (155 < x ≤ 178)	= 0,2259
P6 = P (x > 178)	= 0,1335

Através da expressão (4.2) obtém-se o valor de D^2 .

$$D^2 = 2,28$$

Adotando-se nível de significância $\alpha = 5\%$, com $r=3$ graus de liberdade, tem-se da tabela de qui-quadrado, a constante $C=7,81$.

Como $D^2 < C$ não se rejeita a hipótese de distribuição normal de MRF.

GRUPO DIntervalos de Classe e Frequência de Resultados

A1:	$x \leq 108$	$\rightarrow n1 = 2$
A2:	$108 < x \leq 133$	$\rightarrow n2 = 7$
A3:	$133 < x \leq 158$	$\rightarrow n3 = 8$
A4:	$158 < x \leq 186$	$\rightarrow n4 = 10$
A5:	$183 < x \leq 208$	$\rightarrow n5 = 3$
A6:	$x > 208$	$\rightarrow n6 = 2$

Com a média $\bar{X} = 153$ MPa, o desvio padrão $s = 34,9$ e auxílio da tabela de distribuição normal são calculados as probabilidades:

Cálculo das Probabilidades

P1 = P(x \leq 108)	= 0,0985
P2 = P(108 < x \leq 133)	= 0,1858
P3 = P(133 < x \leq 158)	= 0,2714
P4 = P(158 < x \leq 183)	= 0,2494
P5 = P(183 < x \leq 208)	= 0,1379
P6 = P(x > 208)	= 0,057

Através da expressão (4.2) obtém-se o valor de D^2

$$D^2 = 1,64$$

Adotando-se nível de significância $\alpha = 5\%$, com $r=3$ graus de liberdade, tem-se da tabela de qui-quadrado, a constante $C=7,81$.

Com $D^2 < C$ não se rejeita a hipótese de distribuição normal de MRF:

GRUPO EIntervalos de Classe e Frequência de Resultados

A1:	$x \leq 83$	$\rightarrow n_1 = 2$
A2:	$83 < x \leq 105$	$\rightarrow n_2 = 4$
A3:	$105 < x \leq 128$	$\rightarrow n_3 = 7$
A4:	$128 < x \leq 151$	$\rightarrow n_4 = 13$
A5:	$151 < x \leq 174$	$\rightarrow n_5 = 6$
A6:	$x > 174$	$\rightarrow n_6 = 1$

Com a média $\bar{X} = 132$ MPa, o desvio padrão $s = 26,6$ MPa e auxílio da tabela de distribuição normal são calculados as probabilidades:

Cálculo das Probabilidades

$P_1 = P(x \leq 83)$	$= 0,0329$
$P_2 = P(83 < x \leq 105)$	$= 0,1210$
$P_3 = P(105 < x \leq 128)$	$= 0,2865$
$P_4 = P(128 < x \leq 151)$	$= 0,3207$
$P_5 = P(151 < x \leq 174)$	$= 0,1819$
$P_6 = P(x > 174)$	$= 0,0073$

Através da expressão (4.2) obtém-se o valor de D^2 .

$$D^2 = 4,35$$

Adotando-se nível de significância $\alpha = 5\%$, com $r=2$ graus de liberdade, tem-se da tabela de qui-quadrado, a constante $C=5,99$.

Como $D^2 < C$, não se rejeita a hipótese de distribuição normal de MRF.

GRUPO FIntervalos de Classe e Frequência de Resultados

A1:	$x \leq 87$	\rightarrow	$n1 = 2$
A2:	$87 < x \leq 115$	\rightarrow	$n2 = 4$
A3:	$115 < x \leq 143$	\rightarrow	$n3 = 7$
A4:	$143 < x \leq 171$	\rightarrow	$n4 = 11$
A5:	$171 < x \leq 199$	\rightarrow	$n5 = 7$
A6:	$x > 199$	\rightarrow	$n6 = 2$

Com a média $\bar{X} = 148$ MPa, o desvio padrão $s = 35,2$ e auxílio da tabela de distribuição normal são calculadas as probabilidades:

Cálculo das Probabilidades

$P1 = P(x \leq 87)$	$= 0,0418$
$P2 = P(87 < x \leq 115)$	$= 0,1318$
$P3 = P(115 < x \leq 143)$	$= 0,2707$
$P4 = P(143 < x \leq 171)$	$= 0,2979$
$P5 = P(171 < x \leq 199)$	$= 0,1843$
$P6 = P(x > 199)$	$= 0,0735$

Através da expressão (4.2) obtem-se o valor de D^2

$$D^2 = 1,08$$

Adotando-se nível de significância $\alpha = 5\%$, com $r=3$ graus de liberdade, tem-se da tabela de qui-quadrado, a constante $C=7,81$.

Como $D^2 < C$, não se rejeita a hipótese de distribuição normal de MRF.

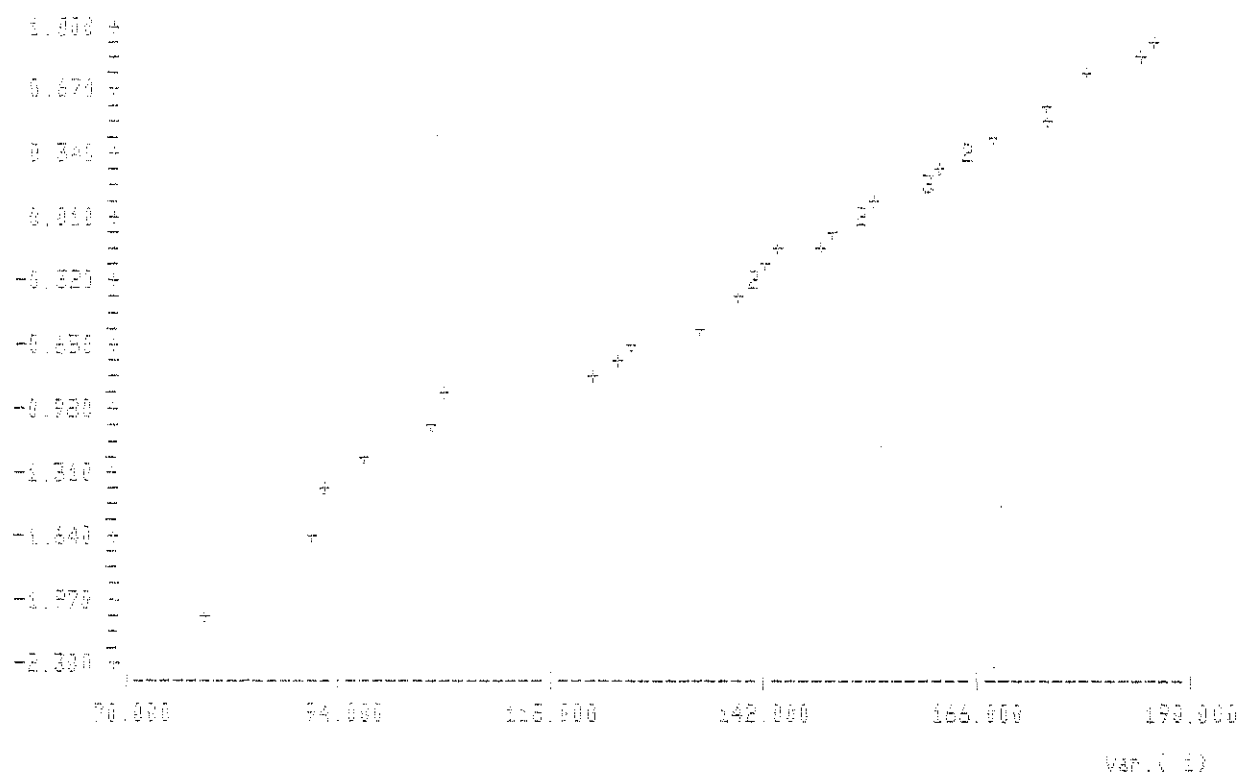
4.4.1.2.3- Resultados obtidos do teste de normalidade

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos com o uso do micromputador Hewlett Packard modelo 9825T, através de programa adaptado pelo Prof. Francisco Antonio Romero Gesualdo.

Grupo A

TESTE DE NORMALIDADE $R^2 = 98.54 \%$
 $F = 44.9994$ COM 30 GRAUS DE LIBERDADE
 $Y = -3.584 + 0.026 X$

DADOS NORM

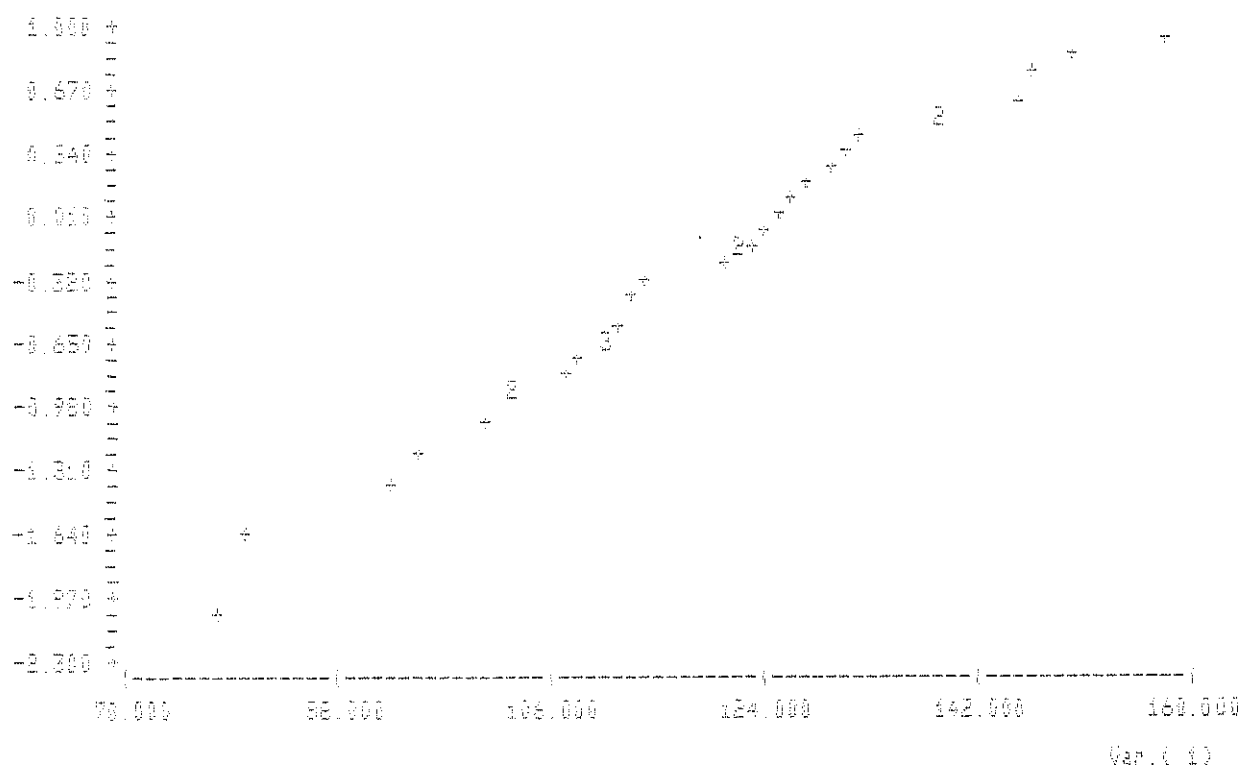


Grupo B

TESTE DE
NORMALIDADE

R2 = 97.80 %
T = 36.4957 COM 30 GRAUS DE LIBERDADE
Y = -4.569 + 0.037 X

DADOS NORM.

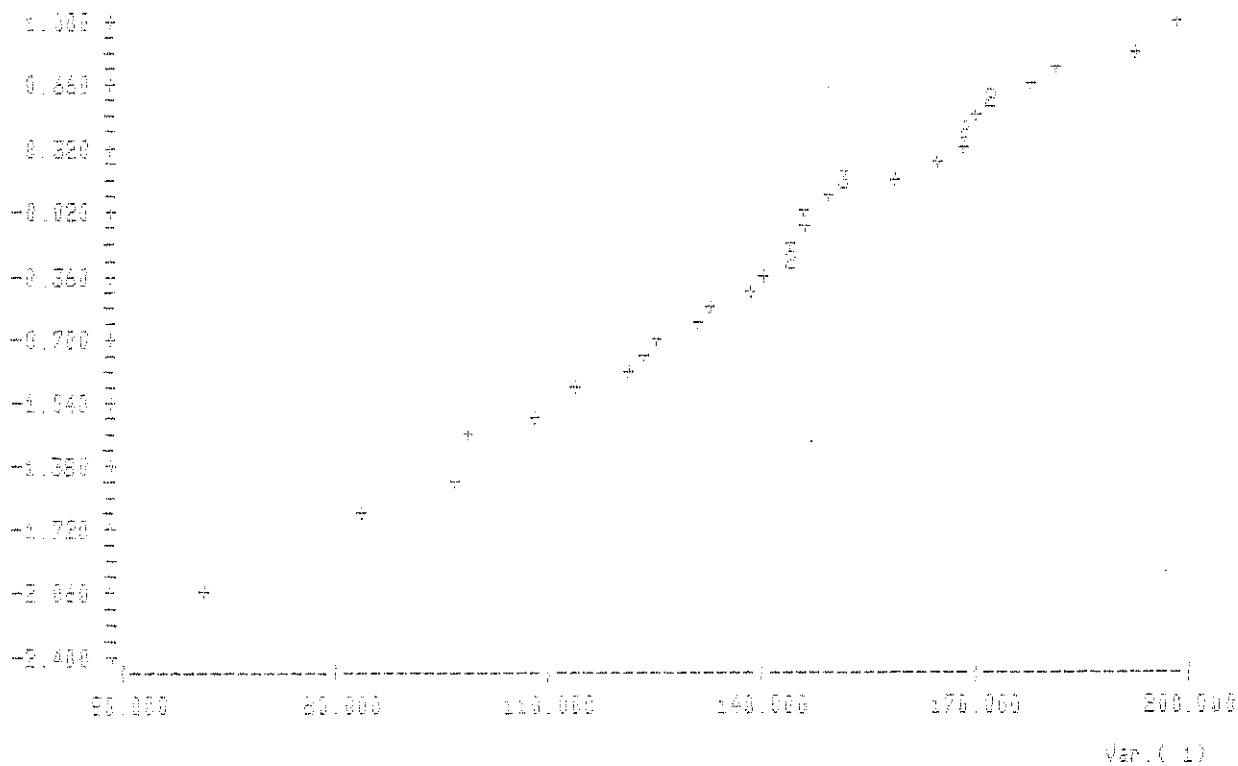


Grupo C

TESTE DE
NORMALIDADE

R2 = 98.69 %
 t = 53.4264 COM 32 GRAUS DE LIBERDADE
 Y = -3.712 + 0.024 X

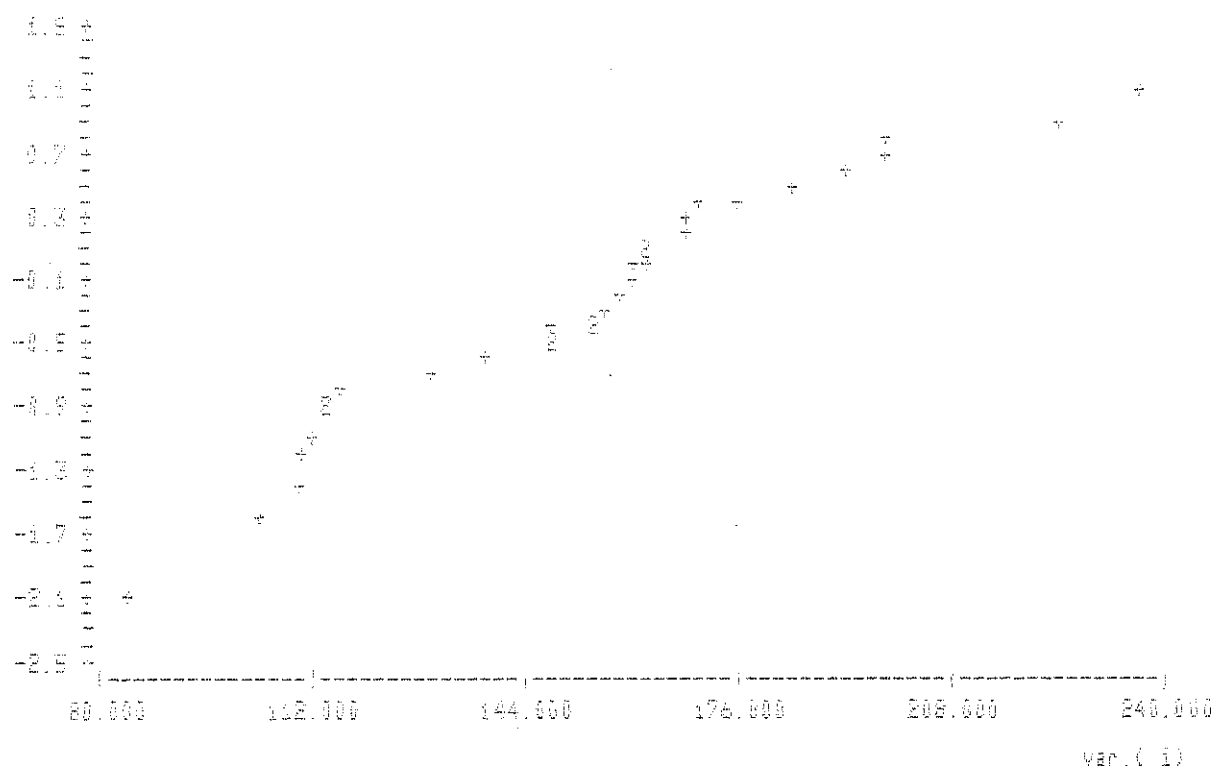
DADOS NORM.



Grupo D

TESTE DE NORMALIDADE $R^2 = 94.21 \%$
 $T = 22.1035$ COM 30 GRAUS DE LIBERDADE
 $Y = -3.522 + 0.021 X$

34008 NORM.

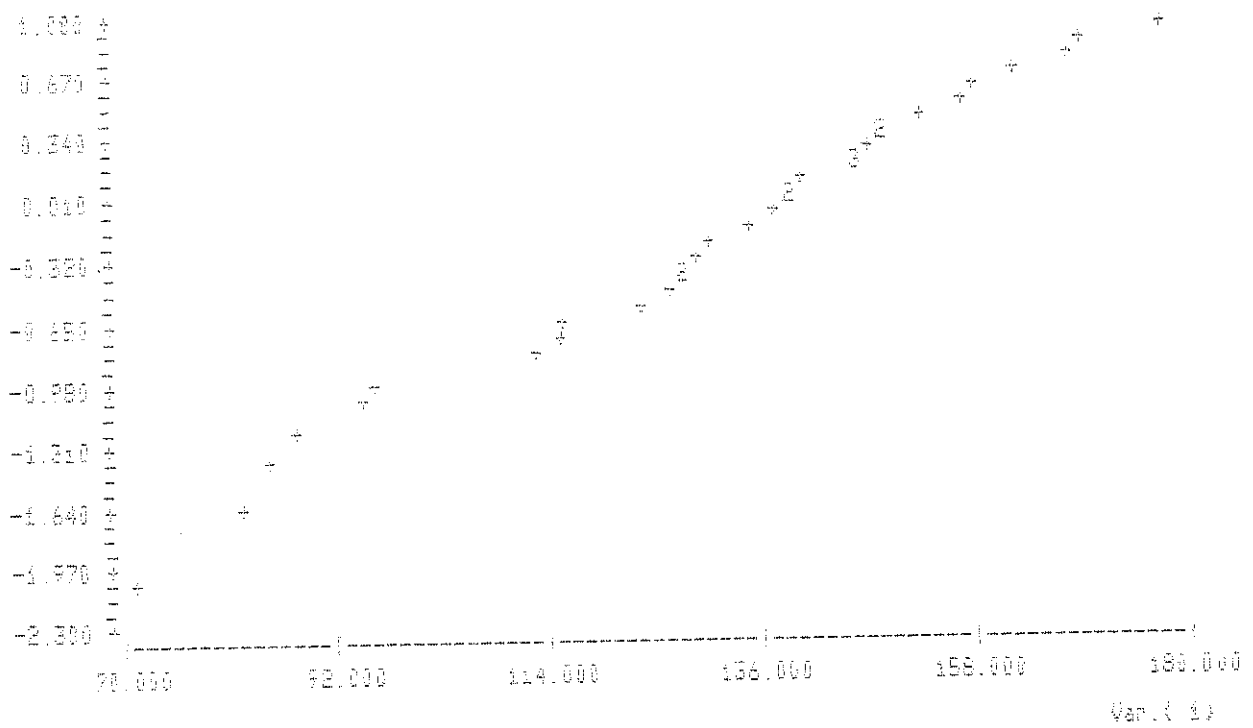


Grupo E

TESTE DE
NORMALIDADE

K-S = 98.67 %
 T = 46.6328 COM 31 GRAUS DE LIBERDADE
 Y = -3.627 + 0.027 X

DADOS NORM

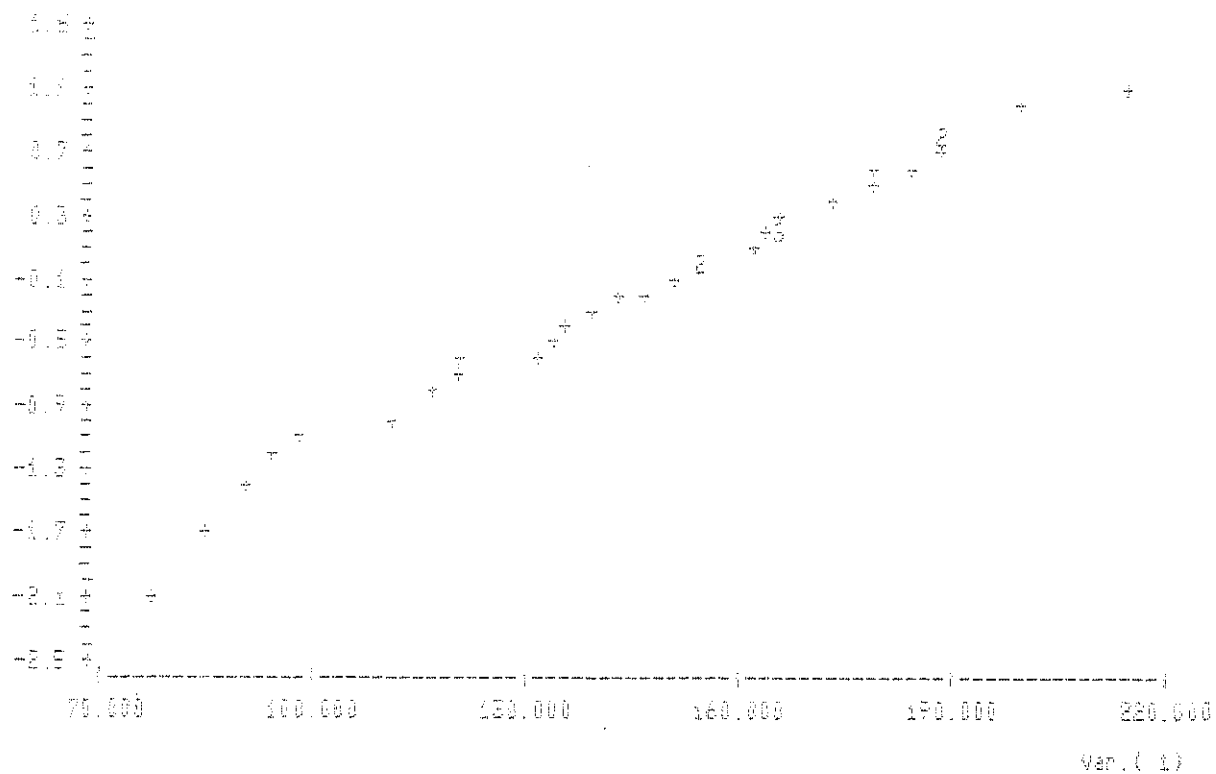


Grupo F

TESTE DE
NORMALIDADE

RE = 98.48 X
T = 44.7801 COM 51 GRAUS DE LIBERDADE
Y = -3.445 + 0.022 X

DOSES NORM.



4.4.1.2.4- Distribuição de frequência de MRF - Conclusão

Todos os testes estatísticos efetuados para o estudo da distribuição de frequência dos valores do módulo de resistência à flexão: histograma, testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov, teste de aderência de Pearson e teste de normalidade, evidenciaram claramente ser possível admitir a hipótese da distribuição normal.

Por esta razão, a partir desta proposição serão apresentados os itens subsequentes do trabalho.

4.4.2- Variação do valor médio e do desvio padrão de MRF com a umidade da madeira

Neste item é abordada a influência da umidade da madeira no valor médio do módulo de resistência à flexão ($\overline{\text{MRF}}$) bem como são analisadas outros parâmetros referentes à função de distribuição de MRF: o desvio padrão (σ), a dispersão dos resultados (D =diferença entre o maior e o menor dos valores observados) e o coeficiente de variação (CV = razão entre o desvio padrão e o valor médio de MRF).

Para facilitar a visualização, os resultados foram resumizados na tabela 4.1, a seguir.

GRUPO	UMIDADE (%)	$\overline{\text{MRF}}$ (MPa)	σ (MPa)	D (MPa)	CV
B	20	118	19,1	80	0,162
E	16	132	26,6	105	0,199
A	12	143	28,4	107	0,200
C	8	144	30,6	136	0,213
F	6	148	35,2	137	0,238
D	3	153	34,9	151	0,228

Com base nos resultados da tabela 4.1 alguns comentários podem ser feitos:

. Há um evidente aumento de $\overline{\text{MRF}}$ com a diminuição da umidade da madeira, para níveis inferiores ao ponto de saturação das fibras.

. Há um aumento da dispersão entre os valores experimen -

tais observados quando se registra redução da umidade da madeira, para níveis inferiores ao ponto de saturação das fibras.

. Há um aumento dos valores referentes ao desvio padrão das distribuições quando se registra redução da umidade da madeira, para níveis inferiores ao ponto de saturação das fibras.

. Há um aumento dos valores do coeficiente de variação quando se registra redução da umidade da madeira, para níveis inferiores ao ponto de saturação das fibras.

Diante destas colocações, é imediato se inferir algumas observações a respeito do módulo de resistência à flexão característico (MRF_k). Tal será feito no próximo item.

4.4.3- Variação de MRF_k com a umidade da madeira

Segundo descrevem alguns autores e, especificamente Mascia (17), a resistência característica da madeira à flexão estática pode ser calculada pela expressão:

$$fwk = fwm - nsw \dots\dots\dots (4.3)$$

onde: fwk = valor característico de resistência da madeira à flexão estática

fwm = valor médio da distribuição, no caso admitida normal à vista do item 4.4.1.2.4.

n = coeficiente dependente da probabilidade de serem obtidos resultados inferiores a fwk (no caso, 5% de probabilidade). Adotado como sendo igual 1,645, referente à distribuição normal.

sw = desvio padrão da amostra.

Tendo sido admitida distribuição normal, com o auxílio da equação 4.3 é possível calcular o valor do módulo de resistência à flexão característico (MRF_k , aqui tomando como notação equivalente a fwk), para os diversos níveis de umidade da madeira.

Para facilitar a visualização, os resultados foram resumizados na tabela 4.2 a seguir.

GRUPO	UMIDADE (%)	MRF _k (MPa)
B	20	86
E	16	88
A	12	96
C	8	94
F	6	90
D	3	96

Com base nos resultados apresentados nesta tabela é possível observar:

. O valor característico do módulo de resistência à flexão não é influenciado pela redução da umidade da madeira, para níveis de umidade abaixo do ponto de equilíbrio ao ar. Um modo expedido de se verificar este fato se constitui em fazer uma regressão linear entre as variáveis MRF_k e umidade. Assim sendo, considerando os valores de U entre 3 e 12% bem como os respectivos MRF_k, tem-se:

$$\text{MRF}_k = 0,140U + 92,9 \text{ (MPa)}$$

com $r^2 = 0,035$

Este valor de r^2 próximo a zero denota, evidentemente, a insignificante dependência linear entre as variáveis MRF_k e U, para U inferior ao ponto de equilíbrio ao ar, ou seja, abaixo de 12% nas condições ambientais usuais.

. O valor característico do módulo de resistência à flexão é influenciado pela redução da umidade, para o intervalo compreendido entre o ponto de equilíbrio ao ar e o ponto de saturação das fibras. Para se verificar rapidamente este fato pode ser feita uma regressão linear entre as variáveis MRF_k e umidade. Deste modo, considerando os valores de U entre 12 e 20% bem como os respectivos valores de MRF_k, tem-se:

$$\text{MRF}_k = - 1,25U + 110,0 \text{ (MPa)}$$

com $r^2 = 0,89$

Este valor de r^2 próximo à unidade evidencia com clareza a forte dependência linear entre as variáveis MRF_k e U, para U compreendido no intervalo referido.

5- AVALIAÇÃO INICIAL DA VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM FUNÇÃO DA UMIDADE

5.1- INTRODUÇÃO

Analogamente ao capítulo 4, o desenvolvimento deste capítulo está justificado pela necessidade de adequar a NBR 7190 aos conceitos de segurança estrutural baseados em métodos semi-probabilísticos. Com relação ao módulo de elasticidade à flexão, resolveu-se fazer a presente avaliação inicial do assunto, sem dúvida importante não só pelas suas múltiplas derivações, como também pelos diversos problemas práticos relacionados com a variação do módulo de elasticidade à flexão durante a vida útil de peças com funções estruturais. A mencionada avaliação é também pioneira na literatura nacional a respeito do assunto.

Seria natural se esperar valores mais elevados para o módulo de elasticidade à flexão para níveis mais baixos de umidade. Entretanto, em termos de valores característicos, é necessário considerar a dispersão dos resultados e nem sempre a realidade refletirá idéias intuitivamente aceitas "a priori".

A importância e o interesse da determinação da referida variação estão detalhadas no capítulo 1, não sendo aqui repetidas.

5.2- EXPERIMENTAÇÃO REALIZADA

5.2.1- Generalidades

Valem, neste item, as mesmas considerações citadas no item 4.2.1, do capítulo anterior, a respeito de diversos aspectos relacionados com a experimentação realizada.

5.2.2- Material utilizado

De acordo com as conclusões de Mascia, apresentadas em sua dissertação de mestrado, também para a determinação do módulo de elasticidade à flexão foram empregados corpos de prova de dimensões nominais de 2x2x30 cm, obtidos a partir de vigas de seção transversal 6x12 cm². Optou-se por empregar o Comaru (Coumaruna alata). As vigas mencionadas foram adquiridas em diferentes épocas

em serrarias de São Carlos, pelas razões já expostas.

Ao total foram ensaiados 198 corpos de prova de Comaru.

5.2.3- Ensaaios realizados

A descrição dos ensaios realizados, dos equipamentos em -
pregados, dos carregamentos aplicados, das deformações registradas,
da velocidade de aplicação de carga, do controle de umidade exerci
do nos corpos de prova estão apresentados no capítulo 4, itens
4.2.1 a 4.2.5.

5.3- APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NA EXPERIMENTA - ÇÃO

Com o material utilizado, ensaiado de acordo com a metodo
logia já descrita, foram obtidos os resultados experimentais para
os módulos de elasticidade à flexão. Na tabela 5.1 estão listados
os números de corpos de prova por grupo, referente a cada nível de
umidade considerado.

Grupo	Umidade (%)	nº de corpos de prova
A	12	33
B	20	32
C	8	34
D	3	32
E	16	33
F	6	34

Tabela 5.1

Os resultados do módulo de elasticidade à flexão estão
listados nos itens subsequentes, divididos por nível de umidade.

5.3.1- Grupo A: Umidade de 12%

CP	MOE (MPa)	CP	MOE (MPa)
1	16458	17	17177
2	21211	18	19926
3	16602	19	18773
4	18752	20	15178
5	9972	21	16686
6	17376	22	16043
7	10351	23	11918
8	16968	24	14954
9	15892	25	18856
10	16335	26	15820
11	15178	27	15632
12	18185	28	8093
13	20407	29	16635
14	15891	30	8303
15	19488	31	17948
16	15945	32	17728

5.3.2- Grupo B: Umidade de 20%

CP	MOE (MPa)	CP	MOE (MPa)
1	9451	17	14667
2	17202	18	14776
3	11846	19	13187
4	19456	20	12430
5	13281	21	12175
6	13778	22	12991
7	13920	23	17685
8	14629	24	4915
9	12710	25	11191
10	15648	26	15630
11	13193	27	14136
12	13683	28	13044
13	14489	29	14661
14	12101	30	6541
15	12843	31	13135
16	8967	32	13153

5.3.3- Grupo C: Umidade de 8%

CP	MOE (MPa)	CP	MOE (MPa)
1	19003	18	11441
2	12979	19	10917
3	11851	20	12318
4	14604	21	10168
5	15742	22	11396
6	12702	23	13285
7	16210	24	19250
8	9826	25	14416
9	19583	26	17790
10	16947	27	7381
11	17190	28	14155
12	15214	29	15056
13	13962	30	14527
14	15538	31	13655
15	14038	32	11659
16	14440	33	13829
17	9928	34	15965

5.3.5- Grupo D: Umidade 3%

CP	MOE (MPa)	CP	MOE (MPa)
1	13141	17	15915
2	15155	18	12635
3	14453	19	10924
4	12530	20	13620
5	17630	21	15119
6	12895	22	17531
7	13871	23	19119
8	16715	24	17371
9	18837	25	13639
10	14703	26	11678
11	16715	27	21083
12	15810	28	14094
13	16493	29	15645
14	13908	30	21055
15	15645	31	11055
16	16638	32	14649

5.3.5- Grupo E - Umidade 16%

CP	MOE (MPa)	CP	MOE (MPa)
1	15681	17	11168
2	15463	18	13502
3	15259	19	11444
4	18879	20	11547
5	16555	21	15780
6	16612	22	10403
7	10493	23	13467
8	13666	24	15184
9	13007	25	15211
10	14310	26	12056
11	15939	27	15783
12	16720	28	15362
13	14397	29	16064
14	13608	30	15384
15	10260	31	17400
16	17765	32	13887

5.3.6- Grupo F: Umidade 6%

CP	MOE (MPa)	CP	MOE (MPa)
1	13991	17	17005
2	15837	18	16640
3	13616	19	16872
4	10908	20	14143
5	14586	21	17303
6	14280	22	16001
7	19681	23	16242
8	12464	24	17078
9	15029	25	16478
10	17921	26	13582
11	15229	27	19111
12	8622	28	15451
13	18521	29	17740
14	18524	30	15076
15	16450	31	13850
16	15754	32	22865

5.4- ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.4.1- Distribuição de frequência dos módulos de elasticidade à flexão estática

Da mesma forma do que foi realizado no capítulo anterior para os módulos de ruptura (item 4.4.1), neste item são apresentados os resultados encontrados do estudo estatístico para se definir a função densidade de probabilidade do campo amostral para o módulo de elasticidade à flexão.

Inicialmente serão apresentados os histogramas para cada grupo e, depois, os testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov, Pearson e, ainda, o teste de normalidade.

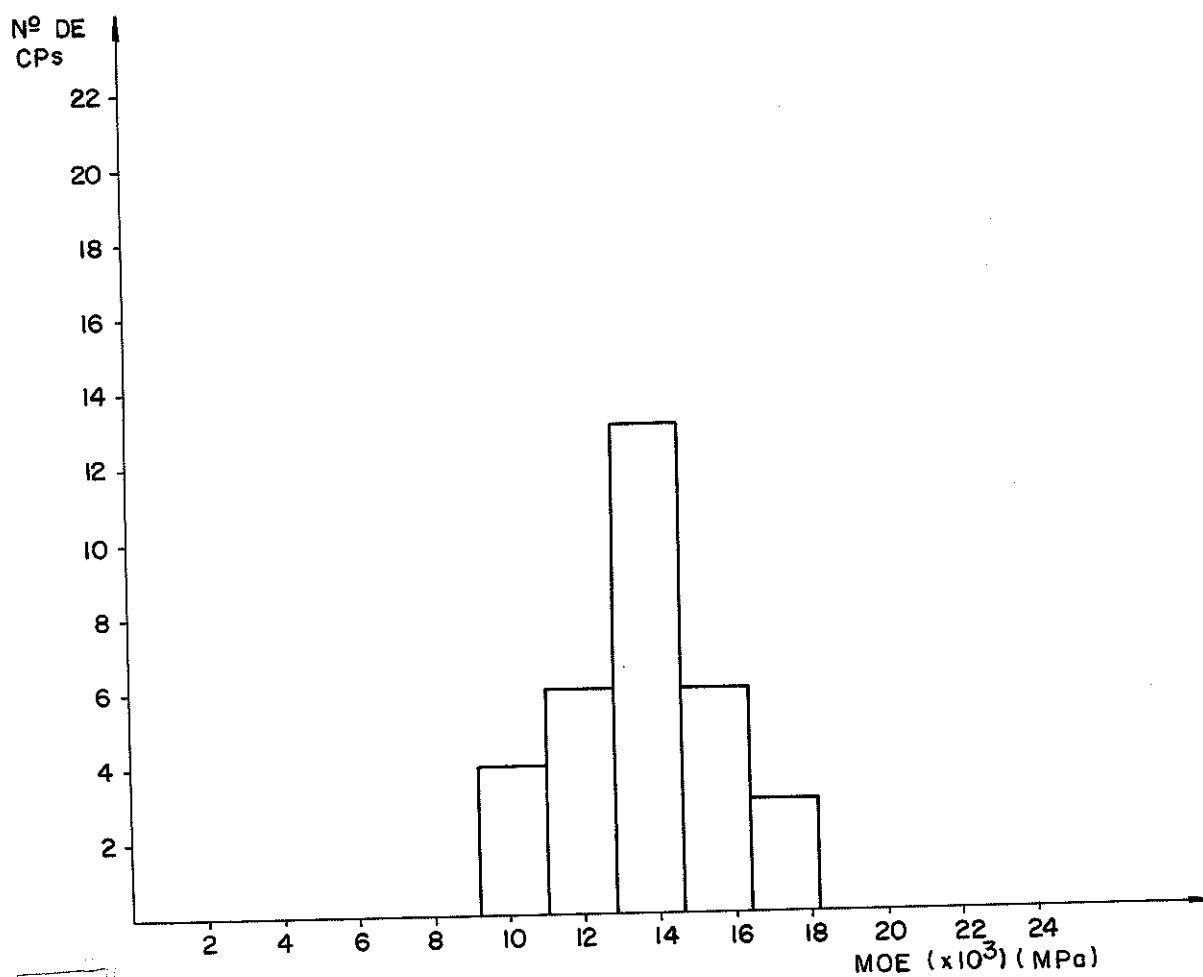
A descrição de cada um dos testes pode ser vista no item 4.4.1.2.

5.5.1.1- Histograma dos resultados

Serão apresentados em ordem decrescente de umidade, para se analisar a variação ou não da dispersão dos resultados.

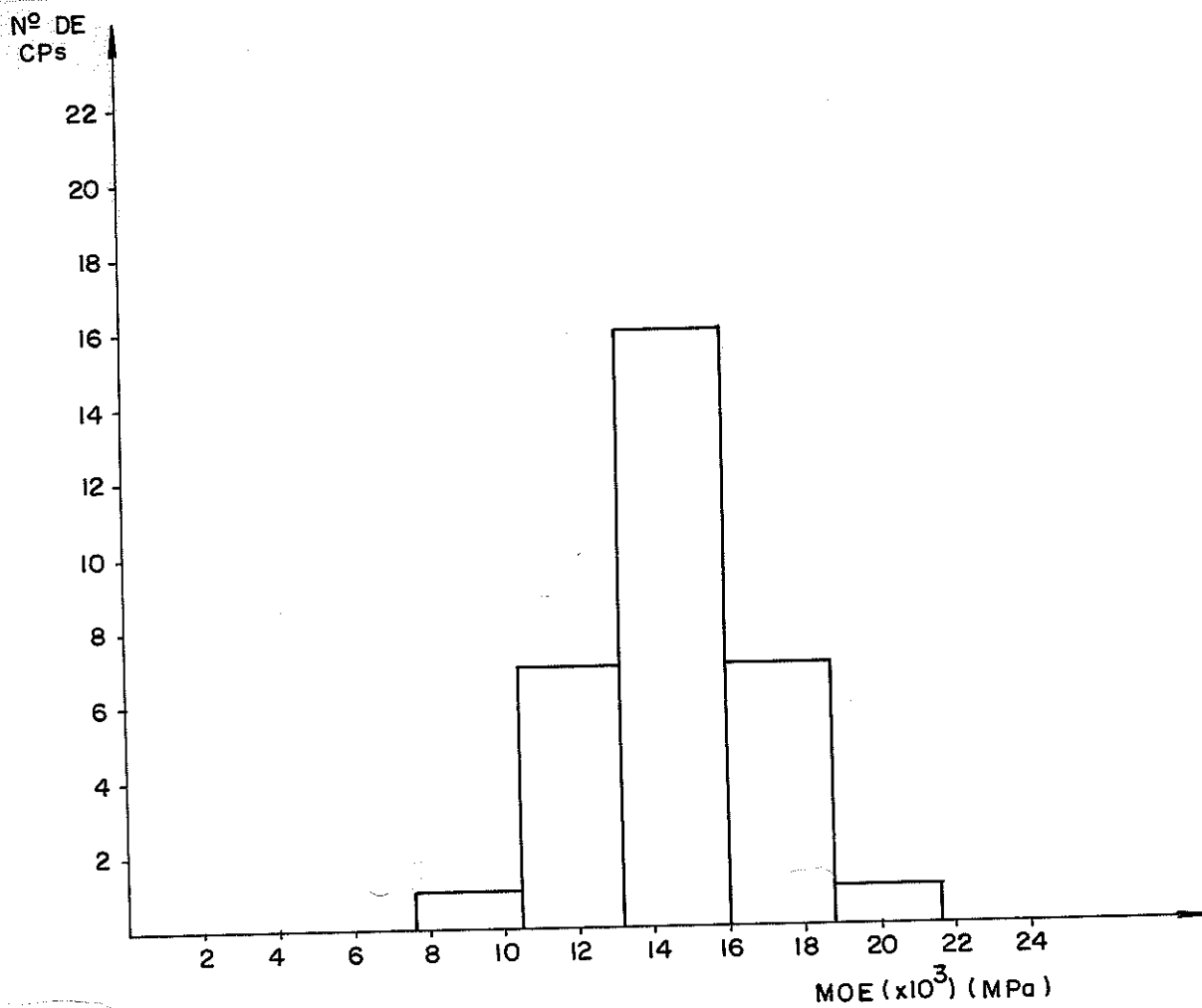
Grupo B: Umidade 20%

MOE (MPa)	nº de corpos de prova
até 11000	4
11001-12800	6
12801-14600	13
14601-16400	6
acima de 16401	3



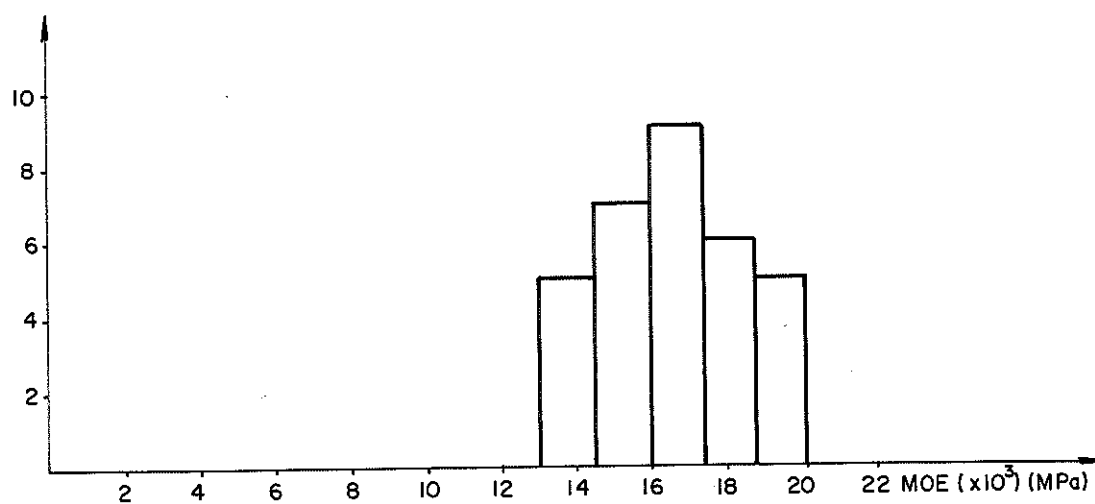
Grupo E: Umidade 16%

MOE (MPa)	nº de corpos de prova
até 10400	1
14401-13133	7
13134-15866	16
15867-18599	7
acima de 18600	1



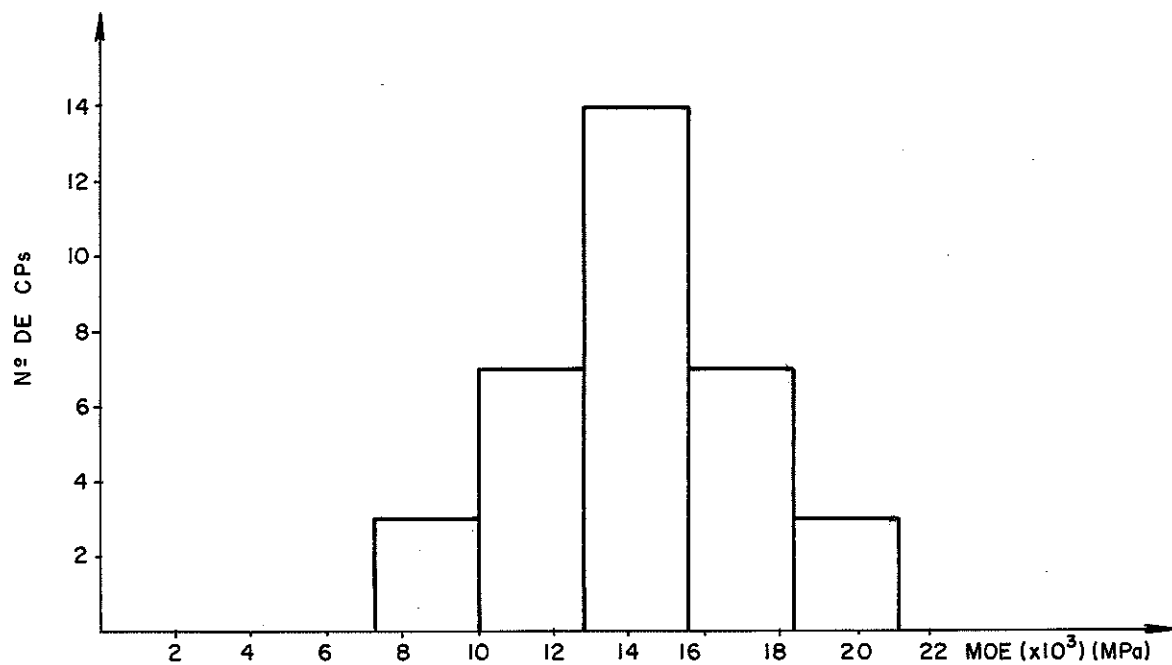
Grupo A: Umidade de 12%

MOE (MPa)	nº de corpos de prova
até 14450	5
14451-15900	7
15901-17350	9
17351-18800	6
acima de 18801	5



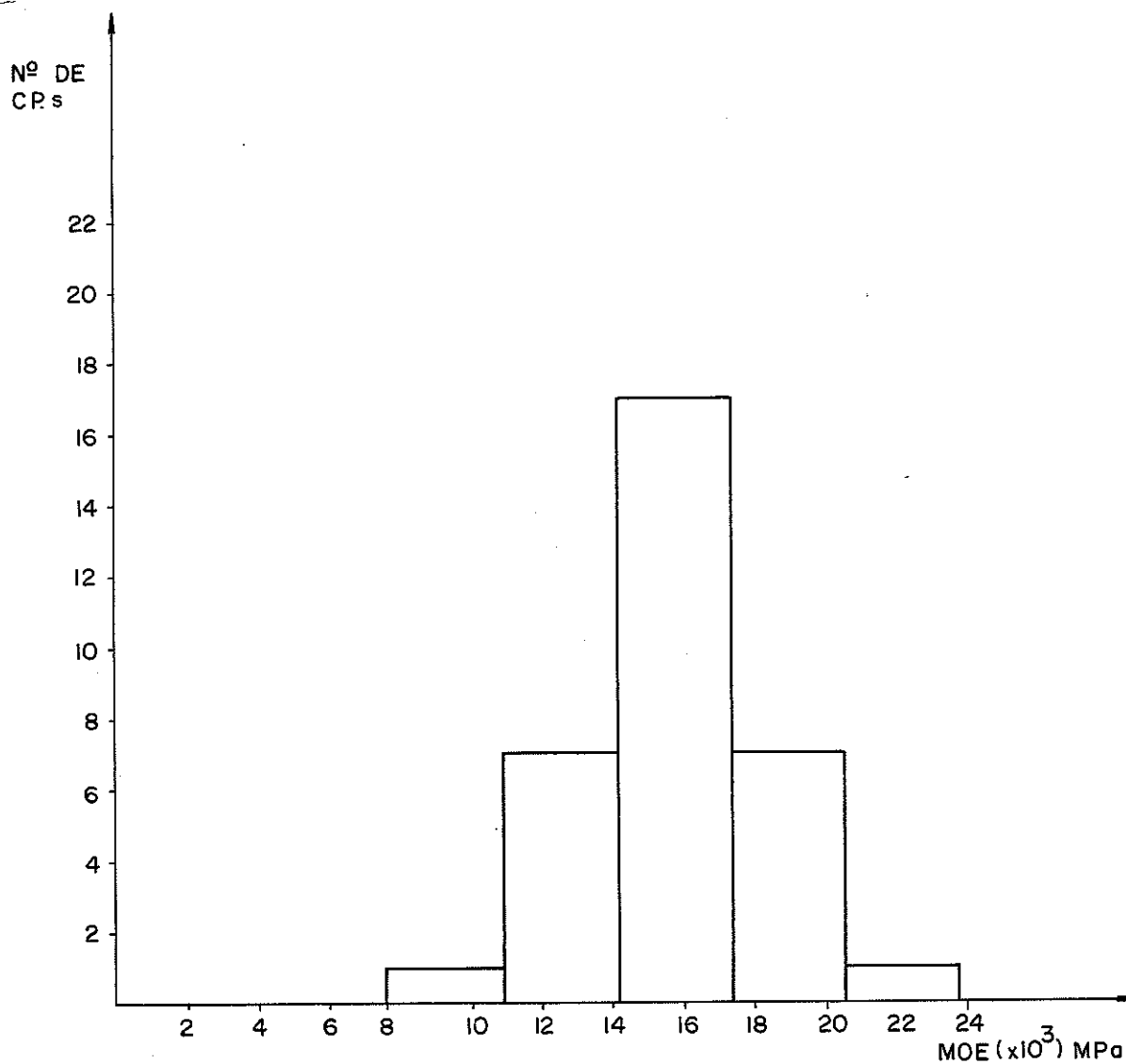
Grupo C: Umidade de 8%

MOE (MPa)	nº de corpos de prova
até 10000	3
11001-12700	7
12701-15400	14
15401-18100	7
acima de 18101	3



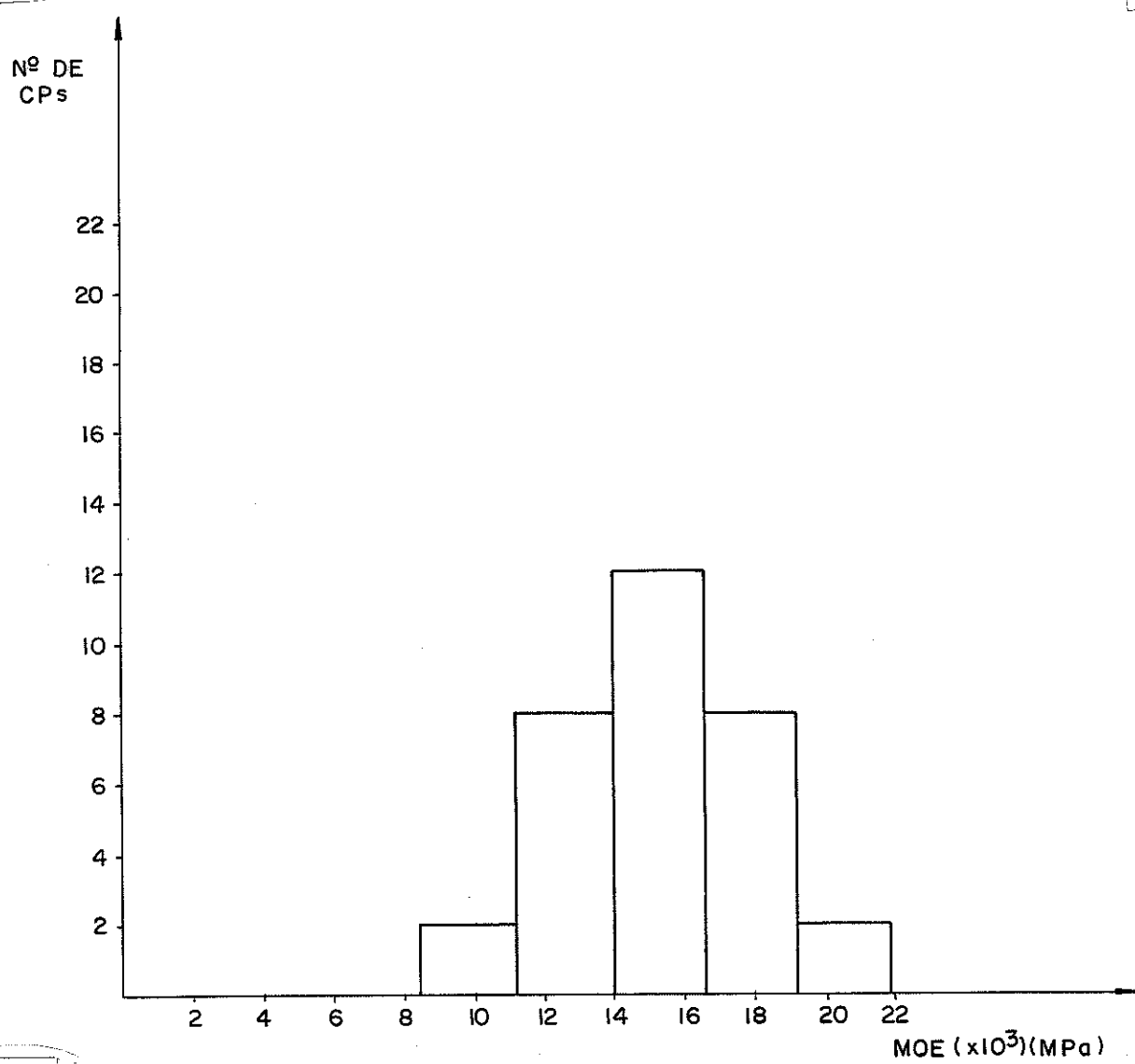
Grupo F: Umidade 6%

MOE (MPa)	nº de corpos de prova
até 10900	1
10901-14200	7
14201-17500	17
17501-21900	7
acima de 21901	1



Grupo D: Umidade de 3%

MOE (MPa)	nº de corpos de prova
até 11200	2
11201-13900	8
13901-16600	12
16601-19300	8
acima de 19301	2



5.4.1.2- Resultados obtidos da aplicação do teste de Kolmogorov-Smirnov

Grupo A

TESTE DE ADERENCIA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

X(*)	Z(*)	F(*)	G(*)	E(*)	D(*)
			0.00000		
8093	-2.47210	0.00680	0.03125	0.00680	0.02445
8303	-2.40714	0.00800	0.06250	0.02325	0.05450
9976	-1.88961	0.02940	0.09375	0.03310	0.06435
10351	-1.77361	0.03840	0.12500	0.05535	0.08660
11918	-1.28888	0.09850	0.15625	0.02650	0.05775
14954	-0.34972	0.36320	0.18750	0.20695	0.17570
15178	-0.28043	0.38970	0.21875	0.20220	0.17095
15178	-0.28043	0.38970	0.25000	0.17095	0.13970
15632	-0.13999	0.44430	0.28125	0.19430	0.16305
15820	-0.08183	0.46810	0.31250	0.18685	0.15560
15891	-0.05987	0.47610	0.34375	0.16360	0.13235
15892	-0.05956	0.47610	0.37500	0.13235	0.10110
15945	-0.04316	0.48400	0.40625	0.10900	0.07775
16043	-0.01285	0.49600	0.43750	0.08975	0.05850
16355	0.08367	0.53190	0.46875	0.09440	0.06315
16458	0.11553	0.54780	0.50000	0.07905	0.04780
16602	0.16007	0.56360	0.53125	0.06360	0.03235
16635	0.17028	0.56750	0.56250	0.03625	0.00500
16686	0.18606	0.57530	0.59375	0.01280	0.01845
16968	0.27329	0.60640	0.62500	0.01265	0.01860
17177	0.33794	0.63310	0.65625	0.00810	0.02315
17376	0.39950	0.65540	0.68750	0.00085	0.03210
17728	0.50839	0.69500	0.71875	0.00750	0.02375
17948	0.57645	0.71900	0.75000	0.00025	0.03100
18185	0.64976	0.74220	0.78125	0.00780	0.03905
18752	0.82516	0.79670	0.81250	0.01545	0.01580
18773	0.83165	0.79670	0.84375	0.01580	0.04705
18856	0.85733	0.80510	0.87500	0.03865	0.06990
19488	1.05283	0.85310	0.90625	0.02190	0.05315
19926	1.18832	0.88300	0.93750	0.02325	0.05450
20407	1.33711	0.90990	0.96875	0.02760	0.05885
21211	1.58582	0.94410	1.00000	0.02465	0.05590

MAXIMO VALOR ENTRE E(*) E D(*)= .20695

A HIPOTESE DE DISTRIBUICAO NORMAL NAO PODE SER REJEITADA

Grupo_B

TESTE DE ADERENCIA DE KOLMOGOROV-SHIRNOV

X(*)	Z(*)	F(*)	G(*)	E(*)	D(*)
			0.00000		
4915	-2.88640	0.00190	0.03125	0.00190	0.02935
6541	-2.31802	0.01020	0.04250	0.02105	0.05230
8967	-1.46999	0.07080	0.09375	0.00830	0.02275
9451	-1.30081	0.09680	0.12500	0.00305	0.02820
11191	-0.69258	0.24510	0.15625	0.12010	0.08885
11846	-0.46362	0.32250	0.18750	0.16655	0.13530
12101	-0.37448	0.35570	0.21875	0.16820	0.13695
12175	-0.34862	0.36320	0.25000	0.14445	0.11320
12430	-0.25948	0.39740	0.28125	0.14740	0.11615
12710	-0.16160	0.43640	0.31250	0.15515	0.12390
12843	-0.11511	0.45220	0.34375	0.13970	0.10845
12991	-0.06338	0.47610	0.37500	0.13235	0.10110
13044	-0.04485	0.48400	0.40625	0.10900	0.07775
13135	-0.01304	0.49600	0.43750	0.08975	0.05850
13153	-0.00675	0.49600	0.46875	0.05850	0.02725
13187	0.00513	0.50400	0.50000	0.03525	0.00400
13193	0.00723	0.50400	0.53125	0.00400	0.02725
13281	0.03799	0.51600	0.56250	0.01525	0.04650
13683	0.17851	0.57140	0.59375	0.00890	0.02235
13778	0.21172	0.58320	0.62500	0.01035	0.04120
13920	0.26136	0.60260	0.65625	0.02240	0.05365
14136	0.33686	0.63310	0.68750	0.02315	0.05440
14489	0.46026	0.67720	0.71875	0.01030	0.04155
14629	0.50919	0.69500	0.75000	0.02375	0.05500
14661	0.52038	0.69850	0.78125	0.05150	0.08275
14667	0.52248	0.69850	0.81250	0.08275	0.11400
14776	0.56058	0.71230	0.84375	0.10020	0.13145
15630	0.85910	0.80510	0.87500	0.03865	0.06990
15646	0.86539	0.80780	0.90625	0.06720	0.09845
17202	1.40860	0.92070	0.93750	0.01445	0.01680
17685	1.57744	0.94300	0.96875	0.00550	0.02575
19456	2.19650	0.98610	1.00000	0.01735	0.01390

MAXIMO VALOR ENTRE E(*) E D(*)= .1682

A HIPOTESE DE DISTRIBUICAO NORMAL NAO PODE SER REJEITADA

Grupo C

TESTE DE ADERENCIA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

X(*)	Z(*)	F(*)	G(*)	E(*)	D(*)
			0.00000		
7381	-2.33969	0.00960	0.02941	0.00960	0.01981
9826	-1.47912	0.06940	0.05882	0.03999	0.01058
9928	-1.44322	0.07490	0.08824	0.01608	0.01334
10168	-1.35875	0.08690	0.11765	0.00134	0.03075
10917	-1.09512	0.13570	0.14706	0.01805	0.01136
11396	-0.92653	0.17620	0.17647	0.02914	0.00027
11441	-0.91069	0.18140	0.20588	0.00493	0.02448
11659	-0.83396	0.20330	0.23529	0.00258	0.03199
11851	-0.76638	0.22060	0.26471	0.01469	0.04411
12318	-0.60201	0.27430	0.29412	0.00959	0.01982
12702	-0.46685	0.31920	0.32353	0.02508	0.00433
12979	-0.36935	0.35570	0.35294	0.03217	0.00276
13285	-0.26165	0.39740	0.38235	0.04446	0.01505
13655	-0.13142	0.44830	0.41176	0.06595	0.03654
13829	-0.07018	0.47210	0.44118	0.06034	0.03092
13962	-0.02336	0.49200	0.47059	0.05082	0.02141
14038	0.00338	0.50000	0.50000	0.02941	0.00000
14155	0.04457	0.51600	0.52941	0.01600	0.01341
14416	0.13643	0.55570	0.55882	0.02629	0.00312
14440	0.14488	0.55570	0.58824	0.00312	0.03254
14527	0.17550	0.57140	0.61765	0.01684	0.04625
14604	0.20260	0.57930	0.64706	0.03835	0.06776
15056	0.36169	0.64060	0.67647	0.00646	0.03587
15214	0.41730	0.66280	0.70588	0.01367	0.04308
15538	0.53134	0.70190	0.73529	0.00398	0.03339
15742	0.60315	0.72570	0.76471	0.00959	0.03901
15965	0.68163	0.75170	0.79412	0.01301	0.04242
16210	0.76787	0.77940	0.82353	0.01472	0.04413
16947	1.02727	0.84850	0.85294	0.02497	0.00444
17190	1.11280	0.86650	0.88235	0.01356	0.01585
17790	1.32398	0.90660	0.91176	0.02425	0.00516
19003	1.75093	0.95990	0.94118	0.04814	0.01872
19250	1.83786	0.96710	0.97059	0.02592	0.00349
19583	1.95507	0.97500	1.00000	0.00441	0.02500

MAXIMO VALOR ENTRE E(*) E D(*)= .0677588

A HIPOTHESE DE DISTRIBUICAO NORMAL NAO PODE SER REJEITADA

Grupo D

TESTE DE ADERENCIA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

X(*)	Z(*)	F(*)	G(*)	E(*)	D(*)
10924	-1.71190	0.04360	0.00000	0.04360	0.01235
11055	-1.66089	0.04850	0.03125	0.01725	0.01400
11678	-1.41834	0.07780	0.06250	0.01550	0.01595
12530	-1.08662	0.13790	0.09375	0.04415	0.01290
12635	-1.04574	0.14690	0.12500	0.02190	0.00935
12895	-0.94452	0.17360	0.15625	0.01735	0.01390
13141	-0.84874	0.19770	0.18750	0.01020	0.02105
13620	-0.66225	0.25460	0.21875	0.02500	0.00460
13639	-0.65485	0.25780	0.25000	0.03585	0.00460
13871	-0.56452	0.28770	0.28125	0.00780	0.02345
13908	-0.55012	0.29120	0.31250	0.00645	0.02480
14094	-0.47770	0.31560	0.34375	0.02130	0.05255
14453	-0.47770	0.31560	0.37500	0.02815	0.05940
14453	-0.33793	0.36690	0.40625	0.00810	0.03935
14649	-0.26162	0.39740	0.43750	0.00885	0.04010
14703	-0.24060	0.40520	0.46875	0.00885	0.04010
15119	-0.07863	0.46810	0.50000	0.03230	0.06355
15155	-0.06462	0.47610	0.53125	0.00065	0.03190
15155	-0.06462	0.47610	0.56250	0.02390	0.05515
15645	0.12616	0.55170	0.59375	0.02045	0.01080
15645	0.12616	0.55170	0.62500	0.01080	0.04205
15810	0.19040	0.57530	0.65625	0.01845	0.04970
15915	0.23128	0.59100	0.68750	0.03400	0.06525
16493	0.45631	0.67720	0.71875	0.02095	0.01030
16638	0.51277	0.69500	0.75000	0.00750	0.02375
16715	0.54275	0.70540	0.78125	0.01335	0.04460
16715	0.54275	0.70540	0.81250	0.04460	0.07585
17371	0.79815	0.78800	0.84375	0.00675	0.02450
17531	0.86044	0.80510	0.87500	0.00740	0.03865
17630	0.89899	0.81590	0.90625	0.02785	0.05910
18837	1.36892	0.91470	0.93750	0.03970	0.00845
19119	1.47871	0.93060	0.96875	0.02435	0.00690
21055	2.23246	0.98710	1.00000	0.04960	0.01835
21083	2.24337	0.98740	1.00000	0.01865	0.01260

MAXIMO VALOR ENTRE E(*) E D(*)= .07585

A HIPOTESE DE DISTRIBUICAO NORMAL NAO PODE SER REJEITADA

TESTE DE ADERENCIA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

Grupo E

TESTE DE ADERENCIA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

X(*)	Z(*)	F(*)	G(*)	E(*)	D(*)
			0.00000		
10260	-1.85914	0.03140	0.03125	0.03140	0.00015
10403	-1.79563	0.03590	0.06250	0.00465	0.02660
10493	-1.75365	0.03920	0.09375	0.02330	0.05455
11168	-1.45582	0.07220	0.12500	0.02155	0.05280
11444	-1.33323	0.09180	0.15625	0.03320	0.06445
11547	-1.28748	0.09850	0.18750	0.05775	0.08900
12056	-1.06138	0.14460	0.21875	0.04290	0.07415
13007	-0.63896	0.26110	0.25000	0.04235	0.01110
13467	-0.43464	0.33360	0.28125	0.08360	0.05235
13502	-0.41909	0.33720	0.31250	0.05595	0.02470
13608	-0.37201	0.35570	0.34375	0.04320	0.01195
13666	-0.34624	0.36320	0.37500	0.01945	0.01180
13887	-0.24808	0.40130	0.40625	0.02630	0.00495
14310	-0.06019	0.47610	0.43750	0.06985	0.03260
14397	-0.02154	0.49200	0.46875	0.05450	0.02325
15184	0.32803	0.62930	0.50000	0.16055	0.12930
15211	0.34002	0.63310	0.53125	0.13310	0.10185
15259	0.36135	0.64060	0.56250	0.10935	0.07810
15362	0.40710	0.65910	0.59375	0.09660	0.06535
15384	0.41687	0.66280	0.62500	0.06905	0.03780
15463	0.45196	0.67360	0.65625	0.04860	0.01735
15681	0.54879	0.70880	0.68750	0.05255	0.02130
15780	0.59277	0.72240	0.71875	0.03490	0.00365
15783	0.59410	0.72240	0.75000	0.00365	0.02760
15939	0.66339	0.74540	0.78125	0.00460	0.03585
16064	0.71892	0.76420	0.81250	0.01705	0.04830
16555	0.93701	0.82640	0.84375	0.01390	0.01735
16612	0.96233	0.83150	0.87500	0.01225	0.04350
16720	1.01030	0.84380	0.90625	0.03120	0.06245
17400	1.31235	0.90490	0.93750	0.00135	0.03260
17765	1.47448	0.92920	0.96875	0.00530	0.03955
18879	1.96930	0.97560	1.00000	0.00685	0.02440

MAXIMO VALOR ENTRE E(*) E D(*)= 0.16055

A HIPOTESE DE DISTRIBUICAO NORMAL NAO PODE SER REJEITADA

Grupo F

TESTE DE ADERENCIA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

X(*)	Z(*)	F(*)	B(*)	E(*)	D(*)
			0.00000		
8622	-2.71691	0.00330	0.03125	0.00330	0.02795
10908	-1.85633	0.03140	0.06250	0.00015	0.03110
12464	-1.27056	0.10200	0.09375	0.03950	0.00825
13582	-0.84969	0.19770	0.12500	0.10395	0.07270
13616	-0.83689	0.20050	0.15625	0.07550	0.04425
13650	-0.74880	0.22660	0.18750	0.07035	0.03910
13991	-0.69372	0.24200	0.21875	0.05450	0.02325
14143	-0.63849	0.26110	0.25000	0.04235	0.01110
14280	-0.58692	0.27760	0.28125	0.02760	0.00365
14586	-0.47172	0.31920	0.31250	0.03795	0.00670
15029	-0.30495	0.38210	0.34375	0.06960	0.03835
15076	-0.28726	0.38590	0.37500	0.04215	0.01090
15229	-0.22966	0.40900	0.40625	0.03400	0.00275
15451	-0.14609	0.44040	0.43750	0.03415	0.00290
15754	-0.03202	0.48800	0.46875	0.05050	0.01925
15837	-0.00078	0.50000	0.50000	0.03125	0.00000
16001	0.06096	0.52390	0.53125	0.02390	0.00735
16242	0.15169	0.55960	0.56250	0.02835	0.00290
16450	0.22999	0.59100	0.59375	0.02850	0.00275
16478	0.24053	0.59480	0.62500	0.00105	0.03020
16640	0.30152	0.61790	0.65625	0.00710	0.03835
16872	0.38886	0.65170	0.68750	0.00455	0.03580
17005	0.43892	0.67000	0.71875	0.01750	0.04875
17078	0.46641	0.68080	0.75000	0.03755	0.06920
17303	0.55111	0.70880	0.78125	0.04120	0.07245
17740	0.71562	0.76420	0.81250	0.01705	0.04830
17921	0.78376	0.78230	0.84375	0.03020	0.06145
18521	1.00963	0.84380	0.87500	0.00005	0.03120
18524	1.01076	0.84380	0.90625	0.03120	0.06245
19111	1.23174	0.89070	0.93750	0.01555	0.04680
19681	1.44632	0.92650	0.96875	0.01100	0.04225
22865	2.64496	0.99590	1.00000	0.02715	0.00410

MAXIMO VALOR ENTRE E(*) E D(*)= .10395

VALOR CRITICO = .224

A HIPOTESE DE DISTRIBUICAO NORMAL NAO PODE SER REJEITADA

5.4.1.3- Resultados obtidos da aplicação do teste de aderência de Pearson

A seguir é apresentado o teste de aderência de Pearson para cada grupo.

GRUPO A

Intervalos de Classe e Frequência de Resultados

A1:	$x < 14450$	$\rightarrow n1 = 5$
A2:	$14450 < x < 15900$	$\rightarrow n2 = 7$
A3:	$15900 < x < 17349$	$\rightarrow n3 = 9$
A4:	$17349 < x < 18799$	$\rightarrow n4 = 6$
A5:	$x > 18799$	$\rightarrow n5 = 5$

Com a média dos resultados $\bar{X} = 16085$ MPa, e o desvio padrão $s = 3233$ MPa e auxílio da tabela de distribuição normal são calculados as probabilidades:

Cálculo das Probabilidades

$P1 = P(x < 14450)$	$= 0,3050$
$P2 = P(14450 < x < 15900)$	$= 0,1711$
$P3 = P(15900 < x < 17349)$	$= 0,1756$
$P4 = P(17349 < x < 18799)$	$= 0,1478$
$P5 = P(x > 18799)$	$= 0,2005$

Através da expressão (4.2) obtem-se o valor de D^2

$$D^2 = 5,43$$

Adotando-se um nível de significância $\alpha = 5\%$, com $r = 2$ graus de liberdade, tem-se da tabela de qui-quadrado, a constante $C = 5,99$.

Como $D^2 < C$ não se rejeita a hipótese de distribuição normal de MOE.

GRUPO BIntervalos de Classe e Frequência de Resultados

A1:	$x < 10944 \rightarrow n_1 = 4$
A2:	$10944 < x < 12768 \rightarrow n_2 = 6$
A3:	$12768 < x < 14592 \rightarrow n_3 = 13$
A4:	$14592 < x < 16416 \rightarrow n_4 = 6$
A5:	$x > 16416 \rightarrow n_5 = 3$

Com a média dos resultados $\bar{X} = 13172$ MPa, e o desvio padrão $s = 2861$ MPa e auxílio da tabela de distribuição normal são calculados as probabilidades.

Cálculo das Probabilidades

$P_1 = P(x < 10944)$	$= 0,2177$
$P_2 = P(10944 < x < 12768)$	$= 0,2266$
$P_3 = P(12768 < x < 14592)$	$= 0,2472$
$P_4 = P(14592 < x < 16416)$	$= 0,1793$
$P_5 = P(x > 16416)$	$= 0,1292$

Através da expressão (4.2) obtém-se o valor de D^2 .

$$D^2 = 5,00$$

Adotando-se um nível de significância $\alpha = 5\%$, com $r = 2$ graus de liberdade, tem-se da tabela de qui-quadrado, a constante $C = 5,99$.

Como $D^2 < C$ não se rejeita a hipótese de distribuição normal de MOE.

GRUPO CIntervalos de Classe e Frequência de Resultados

A1:	$x < 10000$	$\rightarrow n1 = 3$
A2:	$10000 < x < 12700$	$\rightarrow n2 = 7$
A3:	$12700 < x < 15400$	$\rightarrow n3 = 14$
A4:	$15400 < x < 18100$	$\rightarrow n4 = 7$
A5:	$x < 18100$	$\rightarrow n5 = 3$

Com a média dos resultados $\bar{X} = 14028$ MPa, e o desvio padrão $s = 2841$ MPa e auxílio da tabela de distribuição normal são calculadas as probabilidades.

Cálculo das Probabilidades

$P1 = P(x < 10000)$	$= 0,0778$
$P2 = P(10000 < x < 12700)$	$= 0,2414$
$P3 = P(12700 < x < 15400)$	$= 0,3652$
$P4 = P(15400 < x < 18100)$	$= 0,2392$
$P5 = P(x > 18100)$	$= 0,0764$

Através da expressão (4.2) obtém-se o valor de D^2 .

$$D^2 = 0,74$$

Adotando-se um nível de significância $\alpha = 5\%$, com $r = 2$ graus de liberdade, tem-se da tabela de qui-quadrado, a constante $C = 5,99$.

Como $D^2 < C$ não se rejeita a hipótese de distribuição normal de MOE.

GRUPO DIntervalos de Classe e Frequência de Resultados

A1:	$x < 11200$	$\rightarrow n1 = 2$
A2:	$11200 < x < 13900$	$\rightarrow n2 = 8$
A3:	$13900 < x < 16600$	$\rightarrow n3 = 12$
A4:	$16600 < x < 19299$	$\rightarrow n4 = 8$
A5:	$x > 19299$	$\rightarrow n5 = 2$

Com a média dos resultados $\bar{X} = 15321$ MPa e o desvio padrão $s = 2568$ MPa e auxílio da tabela de distribuição normal são calculadas as probabilidades.

Cálculo das Probabilidades

$P1 = P(x < 11200)$	$= 0,0548$
$P2 = P(11200 < x < 13900)$	$= 0,2364$
$P3 = P(13900 < x < 16600)$	$= 0,4003$
$P4 = P(16600 < x < 19299)$	$= 0,2479$
$P5 = P(x > 19299)$	$= 0,0606$

Através da expressão (4.2) obtém-se o valor de D^2

$$D^2 = 0,146$$

Adotando-se um nível de significância $\alpha = 5\%$, com $r = 2$ graus de liberdade, tem-se da tabela de qui-quadrado, a constante $C = 5,99$.

Como $D^2 < C$ não se rejeita a hipótese de distribuição normal de MOE.

GRUPO EIntervalos de Classe e Frequência de Resultados

A1:	$x < 10400$	$\rightarrow n1 = 1$
A2:	$10400 < x < 13133$	$\rightarrow n2 = 7$
A3:	$13133 < x < 15866$	$\rightarrow n3 = 16$
A4:	$15866 < x < 18599$	$\rightarrow n4 = 7$
A5:	$x > 18599$	$\rightarrow n5 = 1$

Com a média dos resultados $\bar{X} = 14446$ MPa e o desvio padrão $s = 2251$ MPa e auxílio da tabela de distribuição normal são calculadas as probabilidades:

Cálculo das Probabilidades

P1 =	$P(x < 10400)$	= 0,0359
P2 =	$P(10400 < x < 13133)$	= 0,2451
P3 =	$P(13133 < x < 15688)$	= 0,4547
P4 =	$P(15688 < x < 18599)$	= 0,2314
P5 =	$P(x > 18599)$	= 0,0329

Através da expressão (4.2) obtém-se o valor de D^2 .

$$D^2 = 0,28$$

Adotando-se um nível de significância $\alpha = 5\%$, com $r = 2$ graus de liberdade, tem-se da tabela de qui-quadrado, a constante $C = 5,99$.

Como $D^2 < C$ não se rejeita a hipótese de distribuição normal de MOE.

GRUPO FIntervalos de Classe e Frequência de Resultados

A1:	$x < 10908 \rightarrow n1 = 2$
A2:	$10908 < x < 14000 \rightarrow n2 = 5$
A3:	$14000 < x < 17092 \rightarrow n3 = 17$
A4:	$17092 < x < 20184 \rightarrow n4 = 8$
A5:	$x > 20184 \rightarrow n5 = 1$

Com a média dos resultados $\bar{X} = 15893$ MPa e o desvio padrão $s = 2656$ MPa e auxílio da tabela de distribuição normal são calculadas as probabilidades.

Cálculo das Probabilidades

$P1 = P(x < 10908)$	$= 0,0314$
$P2 = P(10908 < x < 14000)$	$= 0,2137$
$P3 = P(14000 < x < 17092)$	$= 0,4357$
$P4 = P(17092 < x < 20184)$	$= 0,2687$
$P5 = P(x > 20184)$	$= 0,0505$

Através da expressão (4.2) obtém-se o valor de D^2 .

$$D^2 = 2,32$$

Adotando-se um nível de significância $\alpha = 5\%$ com $r = 2$ graus de liberdade, tem-se da tabela de qui-quadrado, a constante $C = 5,99$.

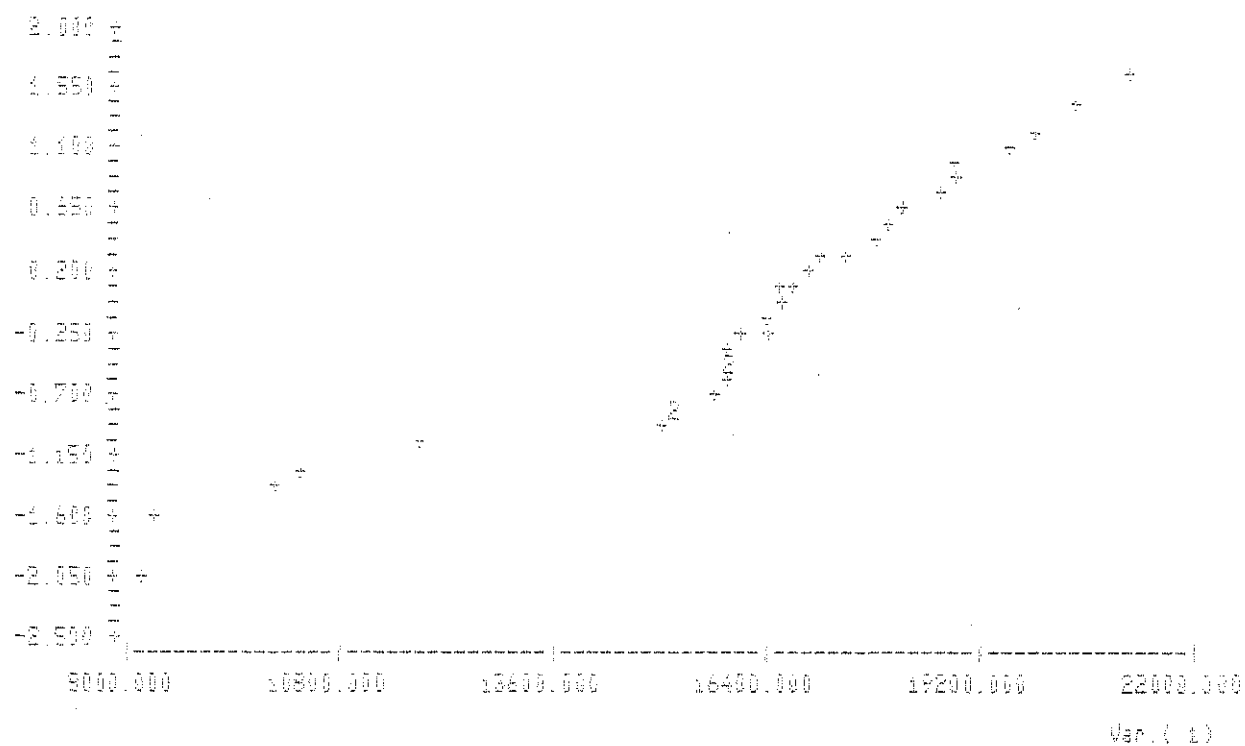
Com $D^2 < C$ não se rejeita a hipótese de distribuição normal de MOE.

5.4.1.4- Resultados obtidos do teste de normalidade

Grupo A

TESTE DE NORMALIDADE R2 = 89.15 %
T = 15.6989 COM 30 GRAUS DE LIBERDADE
Y = -4.354 + 0.000 X

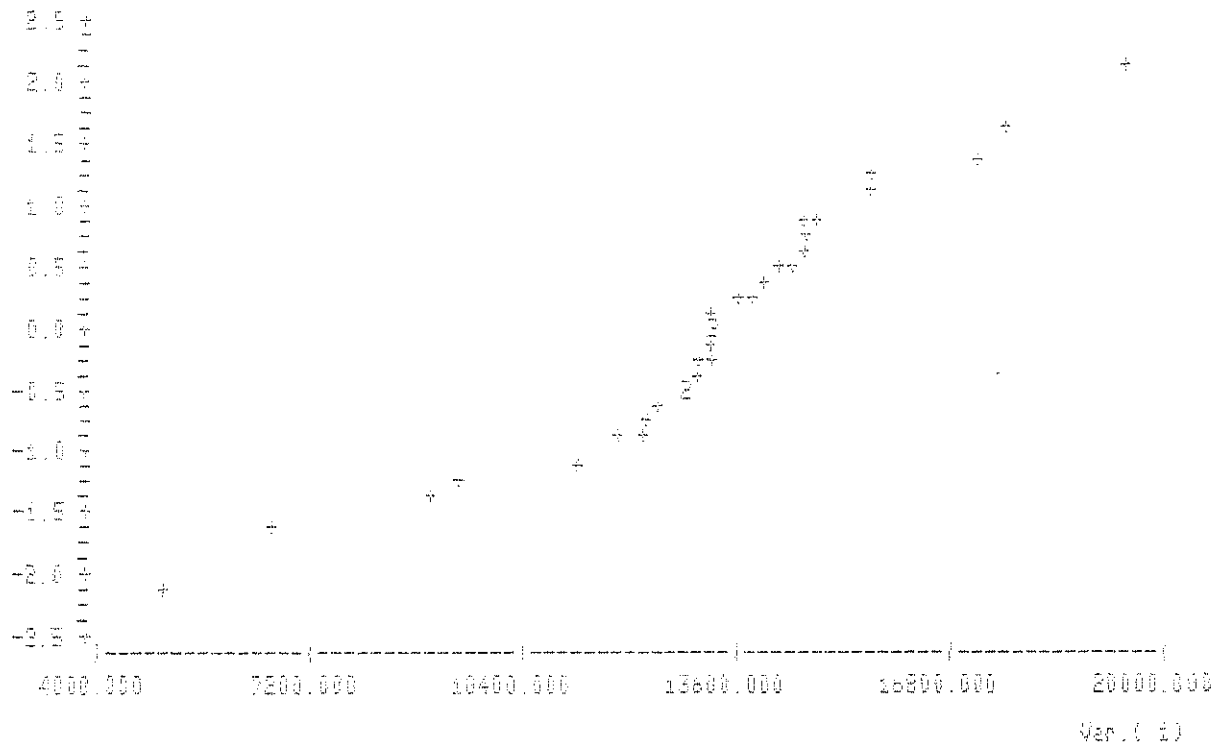
DADOS NORM.



Grupo B

TESTE DE NORMALIDADE RE = 96.76 %
 T = 17.1682 CDh 50 GRAUS DE LIBERDADE
 Y = -4.272 - 0.030 X

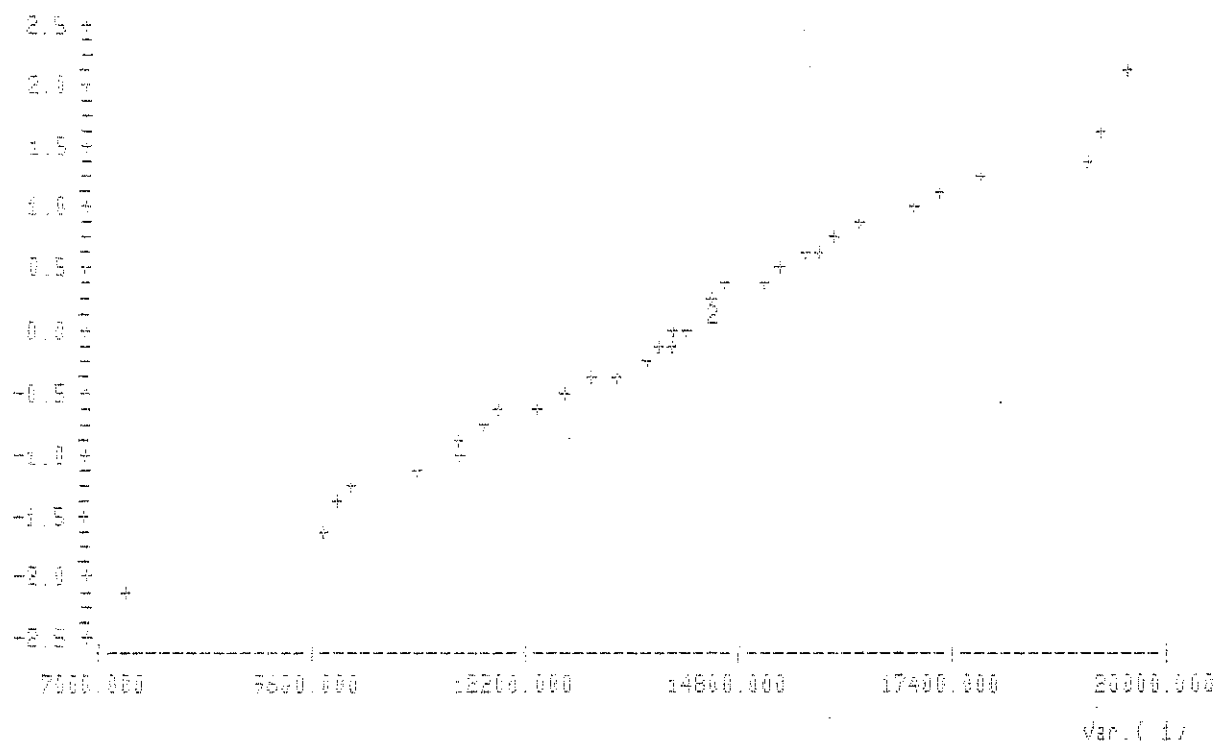
GRADOS NORM.



Grupo CTESTE DE
NORMALIDADE

R2 = 98.85 %
T = 52.4452 DM 32 GRAUS DE LIBERDADE
Y = -4.787 + 0.000 X

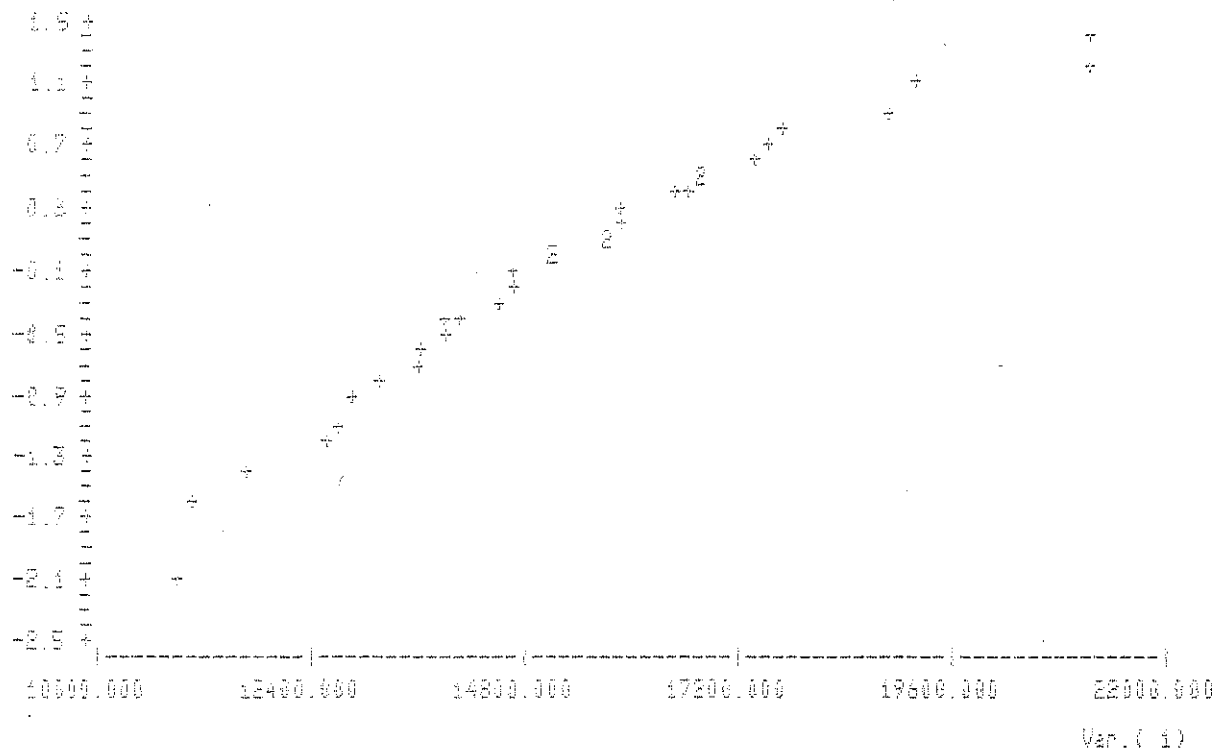
DADOS NORM.



Grupo D

TESTE DE NORMALIDADE $\bar{X} = 74.68 \text{ X}$
 $T = 23.1044 \text{ COM } 30 \text{ GRAUS DE LIBERDADE}$
 $Y = -5.63E + 0.000 \text{ X}$

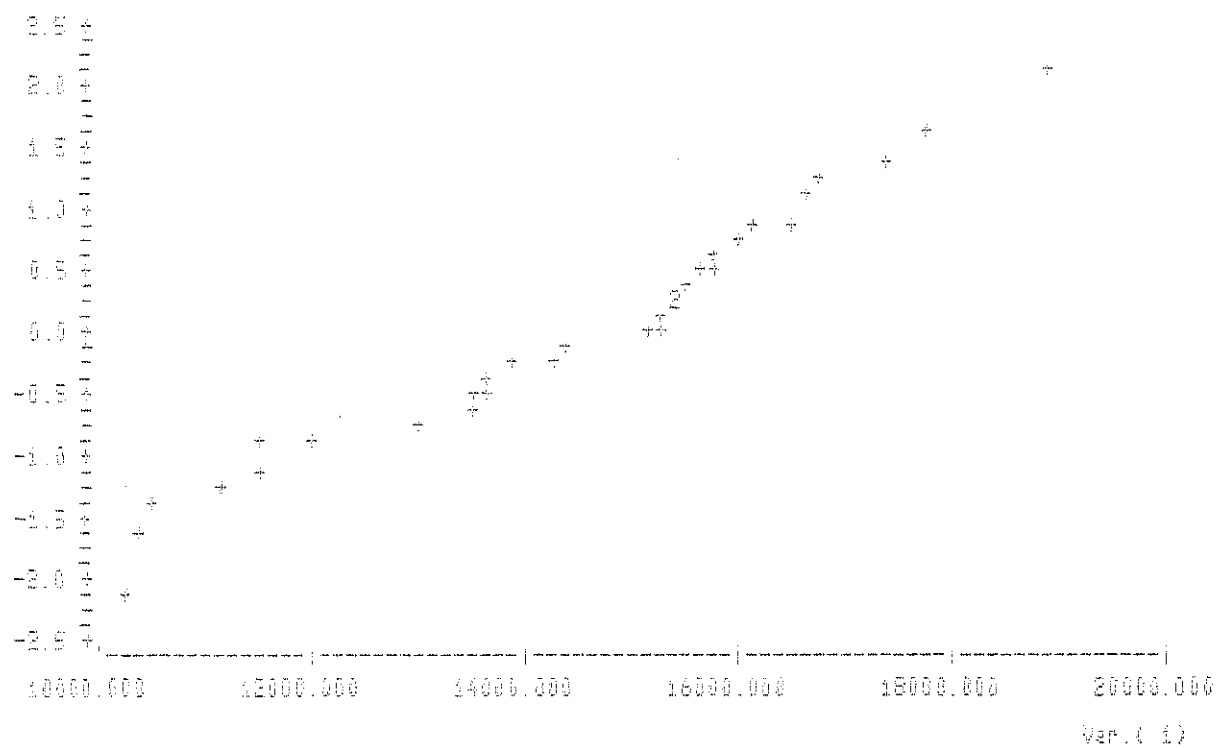
DADOS NORM.



Grupo E

TESTE DE NORMALIDADE RE = 96.52 %
 T = 28.8408 DDF 30 GRAUS DE LIBERDADE
 Y = -5.139 + 0.009 X

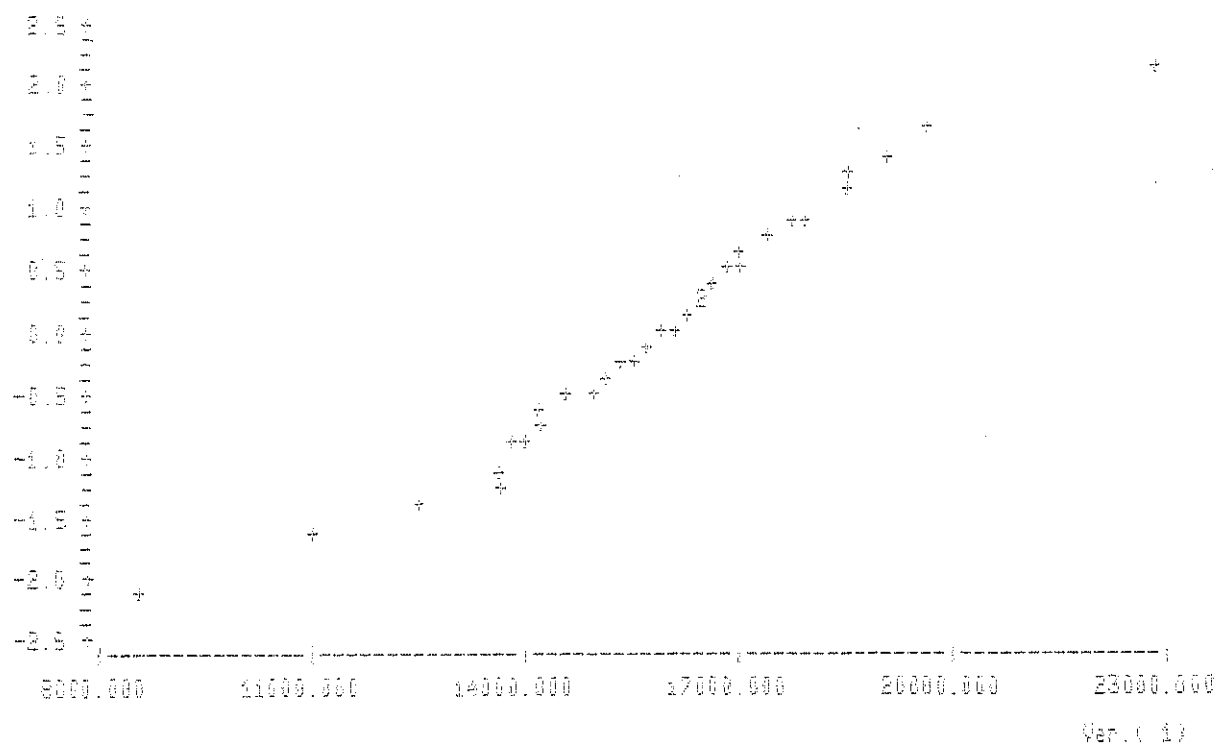
DADOS NORM.



Grupo F

TESTE DE NORMALIDADE R2 = 95.80 %
T = 26.1731 DCM 30 GRAUS DE LIBERDADE
Y = -5.684 + 0.000 X

DADOS NORM.



5.4.1.5- Distribuição de frequência de MOE - Conclusão

Todos os testes estatísticos efetuados para o estudo da distribuição de frequência dos valores do módulo de elasticidade à flexão: histogramas, teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, teste de aderência de Pearson e teste de normalidade, evidenciaram claramente ser possível admitir a hipótese da distribuição normal.

Por esta razão, a partir desta proposição serão apresentados os itens subsequentes do trabalho.

5.4.2- Variação de MOE médio (\overline{MOE}) com a umidade

Neste item foi estudada a influência da umidade em \overline{MOE} e também analisado o comportamento do desvio padrão (σ), a dispersão dos resultados (D = diferença entre o maior e menor resultado) e o coeficiente de variação ($CV = \sigma/\overline{MOE}$) em função da variação da umidade.

Os resultados obtidos foram sumarizados na tabela 5.1 a seguir apresentada.

GRUPO	UMIDADE (%)	\overline{MOE} (MPa)	σ (MPa)	D (MPa)	CV
B	20	13172	2861	14541	0,217
E	16	14446	2251	8690	0,156
A	12	16085	3233	12118	0,201
C	8	14028	2841	12202	0,203
F	6	15839	2656	14243	0,168
D	3	15321	2568	10159	0,168

Tabela 5.1

Com base nos resultados da tabela 5.1 alguns comentários podem ser feitos:

. Há um evidente aumento de \overline{MOE} com a diminuição da umidade da madeira, para níveis inferiores ao ponto de saturação das fibras, até o ponto de equilíbrio ao ar.

. Não existe relação aparente entre a dispersão dos valores experimentais e a redução da umidade da madeira.

. Não existe relação aparente entre os desvios padrão das distribuições e a redução da umidade da madeira.

. Não existe relação aparente entre os coeficientes da variação e a redução da umidade da madeira.

5.4.3- Variação de MOE_k com a umidade da madeira

Tendo sido admitida distribuição normal para os valores dos módulos de elasticidade, nos diversos níveis de umidade, é possível calcular o valor do módulo de elasticidade característico.

Para facilitar a visualização os resultados foram sumariados na tabela 5.2 a seguir.

GRUPO	UMIDADE (%)	MOE_k (MPa)
B	20	8466
E	16	10743
A	12	10767
C	8	9355
F	6	11470
D	3	11097

Com base nos resultados apresentados nesta tabela podem ser feitas algumas observações:

. O valor característico do módulo de elasticidade à flexão não parece ser influenciado pela redução da umidade da madeira, para níveis inferiores ao ponto de equilíbrio ao ar. Um modo rápido de se verificar este fato se constitui em fazer regressão linear entre as variáveis MOE_k e umidade. Assim sendo, considerando os valores de U entre 3 e 12% bem como os respectivos MOE_k , tem-se:

$$MOE_k = - 78U + 11239$$

$$\text{com } r^2 = 0,10$$

Este valor de r^2 próximo a zero evidencia a baixa dependência linear entre as variáveis MOE_k e U, para níveis inferiores ao ponto de equilíbrio ao ar.

. O valor característico do módulo de elasticidade à flexão é influenciado pela redução de umidade, para o intervalo compreendido entre o ponto de equilíbrio ao ar e o ponto de saturação das fibras. Para se verificar rapidamente este fato, faz-se uma regressão linear entre as variáveis MOE_k e umidade. Deste modo, considerando os valores de U entre 12 e 20% bem como os respectivos

valores de MOE_k , tem-se:

$$MOE_k = - 288U + 14594$$

$$\text{com } r^2 = 0,76$$

Este valor de r^2 relativamente alto é um indício marcante da dependência linear entre as variáveis MOE_k e U , para U compreendido no citado intervalo.

6- CONCLUSÕES E PROPOSTAS

No desenvolvimento deste trabalho, as observações efetuadas conduziram a autora a diversas conclusões, cujos aspectos considerados de maior relevância são apresentados a seguir.

. A bibliografia nacional e internacional a respeito do assunto traz informações interessantes a respeito do comportamento da madeira na flexão estática, com abordagem de pontos importantes referentes à influência da umidade em parâmetros de resistência e de elasticidade. Há também algumas referências a respeito da influência da densidade nas citadas propriedades. Entretanto, não foi possível encontrar publicações abordando a análise da influência conjunta da umidade e da densidade da madeira na sua resistência à flexão, assunto tratado no presente trabalho.

. Com base em resultados obtidos na experimentação de corpos de prova e em análise estatística compatível, é possível estabelecer um modelo matemático satisfatório para representar a influência da umidade e da densidade na resistência à flexão da madeira. Este modelo é o registrado na expressão do item 3.4.2.4, página 113, podendo ser plotado em gráficos para facilitar seu emprego. A apresentação dos gráficos se deu traçando-se curvas para diversos níveis de umidade, em geral até o ponto de saturação das fibras, e para diversas densidades dentro da faixa estudada neste trabalho. É possível tirar desta conclusão subsídio para a revisão da NBR 7190 e da NBR 6230.

. Com base nos resultados experimentais e na análise estatística efetuada, é possível admitir a hipótese da distribuição normal das resistências da madeira à flexão, mesmo com as considerações mencionadas em 4.2.1. Além disto, constatou-se aumento do valor médio de MRF com a redução da umidade da madeira para níveis inferiores ao ponto de saturação das fibras. Todavia, aumenta também a dispersão dos resultados e, com isto, o valor característico de MRF não é influenciado pela redução da umidade da madeira, para níveis inferiores ao ponto de equilíbrio ao ar. Entre o ponto de equilíbrio ao ar e o ponto de saturação das fibras MRF_k cresce com a redução da umidade. Destas observações resulta a conclusão da não necessidade de conduzir a secagem da madeira, para uso em estrutura, até níveis inferiores ao ponto de equilíbrio ao ar pois não haverá incremento MRF_k . Na prática isto evidencia a possibilidade

de do emprego da secagem ao ar livre e secagem utilizando energia solar (mais econômicas em relação ao uso de secadores industriais) para redução da umidade de peças de madeira para uso na construção de estruturas.

. Com base nos resultados experimentais e na análise estatística efetuada, é possível admitir a hipótese da distribuição normal dos módulos de elasticidade à flexão da madeira, mesmo com as considerações mencionadas em 4.2.1. Além disto, foi constatado aumento do valor médio de E com a diminuição da umidade da madeira, para níveis inferiores ao ponto de saturação das fibras, até o ponto de equilíbrio ao ar. Por outro lado, não se evidenciou correlação entre a redução da umidade e a dispersão dos resultados experimentais. Ainda assim, o valor característico do módulo de elasticidade à flexão não se mostrou ser influenciado pela redução da umidade da madeira, para níveis inferiores ao ponto de equilíbrio ao ar. Também concluiu-se que E_k aumenta com a redução da umidade, no intervalo compreendido entre o ponto de equilíbrio ao ar e o ponto de saturação das fibras. Valem, neste caso, os mesmos comentários do tópico anterior com relação à secagem da madeira para emprego em estruturas.

Algumas propostas para o prosseguimento do trabalho na direção apontada pelas conclusões mencionadas podem ser feitas.

. Determinar o modelo matemático para representar a influência da umidade e da densidade no módulo de elasticidade à flexão de peças de madeira.

. Prosseguir no estudo referente à variação do módulo de elasticidade característico à flexão com a redução da umidade realizando outros ensaios com o intuito de serem confirmadas as tendências observadas.

. Prosseguir na avaliação do interesse de se empregar, no cálculo de peças estruturais de madeira, o valor do módulo de elasticidade característico.

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION - Timber construction manual. 2.ed. New York, John Wiley and Sons, 1974.
- 2- ANDREWS, H.J. - An introduction to timber engineering. Oxford, Pergamon, 1967.
- 3- BENDTSEN, Alan & GALLIGAN, Willian - Deriving allowable properties of lumber: a practical guide for interpretation of ASTM standards. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., s.d. (General Technical Report, FPL 20).
- 4- COVINGTON, S.A. & FEWELL, A.R. - The effect change in moisture content on the geometrical properties, modulus of elasticity and stiffness of timber. Garston, Building Research Establishment, Departament of the Environment, Febr. 1975. (Current Paper, 21/75).
- 5- CUNHA, R.A.; PISANI, J.F.; GURGEL, J.T.A. - Variação da densidade básica em *Eucalyptus citriodora* Hook, de várias idades. (Boletim Técnico do Instituto Florestal, 36 (2): 59-74, jul. 1982.
- 6- DAMIANO, Antonio R. Genovez - Introdução ao estudo do módulo de elasticidade transversal e suas correlações com outras constantes elásticas da madeira. São Carlos, LaMEM - EESC-USP, 1981/82. (Relatórios de Iniciação Científica n^{os} 1 e 2).
- 7- ETHINGTON, R.L. - Structural property estimation from density samples for western woods. Forest Products Journal, 15 (10): 422-425, Oct. 1965.
- 8- FOREST PRODUCTS LABORATORY - Wood handbook: wood as an engineering material. Washington, D.C., FPL-FS-USDA, 1974. (Agriculture Handbook n^o 72).
- 9- GERHARDS, C.C. - Dependence of MOE on strength ratio and specific gravity: 4-inch-thick southern pine. Forest Products Journal, 20 (6): 37-38, June, 1970.

- 10-_____ - Seasoning factors for modulus of elasticity and modulus of rupture. Journal of the FPRS, 18 (11): 27, Nov. 1968.
- 11-HELLMEISTER, J.C. - Sobre a determinação das características físicas da madeira. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1973. 161p. Tese (Doutor- Engenheiro).
- 12-HOYLE JR, R.J. - Wood technology in the design of structures. 3.ed. Missoula, Montana, Montain Press, 1972. 370p.
- 13-_____ - Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models. Sep. de: Wood and Fiber, 5 (1): 41-49, Spring, 1973.
- 14-JOHNSON, J.W. - Relationships among modulus of elasticity and rupture: seasoned and unseasoned coast-type douglas fir and seasoned western hemlock. Sep. de: Symposium Nondestructive Testining of Wood, 2.- PROCEEDINGS, April 1965.
- 15-KARLSEN, G.G., ed. - Wooden structures. Moscou, Mir, 1967.
- 16-MACLEAN, J.D. - Effect of heating in water on the strength properties of wood. Washington, American Wood-Preservars' Association, 1954.
- 17-MASCIA, Nilson Tadeu- Contribuição ao estudo da flexão estática em peças de madeira. Orientador: Prof. Dr. João C. Hellmeister. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1985. 30p. Dissertação (Mestre-Engenharia de Estruturas).
- 18-MECLAIN, T.E. et alii - The influence of moisture content on the flexural properties of Southern pine dimension lumber. USDA-FS-FLP, Mad., Wis., Oct. 1984. 40p. (Research Paper, FPL 447).
- 19-MENDES, A.P. - Resistência da madeira ao cisalhamento. Orientador: Prof. Dr. João Cesar Hellmeister. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1984. 157p. Dissertação (Mestre-Engenharia de Estruturas).
- 20-OLIVEIRA, Luiz Carlos de Sampaio - Perguntas e respostas a respeito em secagem de madeiras. São Carlos, IPT, Dez. 1981. (Publ.Int. nº9).

- 21-OZELTON, E.C. & BAIRD, J.A. - Timber designers' manual. London Crosby Lock Wood Staples, 1976.
- 22-PIGOZZO, J.C. - Influência da umidade e da densidade na resistência à compressão da madeira. Orientador: Prof. Dr. João Cesar Hellmeister. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1982. 141p. Dissertação (Mestre-Engenharia de Estruturas).
- 23-ROCCO LAHR, Francisco Antonio - Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira. Orientador: Prof. Dr. João Cesar Hellmeister. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1983. Tese (Doutor-Engenheiro).
- 24-SIMPSON, William T. - Equilibrium moisture content prediction for wood. Forest Products Journal, 21 (5): 48-49, May, 1971.
- 25-TANAAMI, Raquel Gonçalves - Influência da umidade e da densidade na resistência à flexão da madeira. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1985-86. (Bolsa de Mestrado I e II - FAPESP - Relatórios nº 1 a 4).
- 26-WILSON, T.R.C. - Strength-moisture relations for wood. Washington, D.C., USDA, Mar. 1932. 88p. (Technical Bulletin nº 282).
- 27-WILSON, T.R.C.; CARLSON, T.A.; LUXFORD, R.F. - The effect of partial seasoning on the strength of wood. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., (1024), 1960.
- 28-YOUNGS, R.L. & JAMES, W.L. - Control and measurement of moisture in wood. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., s.d. p.307-319.