Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Instituto de Física de São Carlos
Instituto de Química de São Carlos

TENACIDADE DA MADEIRA

DEDALUS - Acervo - EESC

31100017125

Denise Ortigosa Stolf

Dissertação apresentada à Área Interunidades
em Ciência e Engenharia de Materiais como
parte dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr

São Carlos

2000

Class.	TESE-EESC
Cutt.	5901
Tombo	028/01

st 1129193

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

S875t Stolf, Denise Ortigosa
Tenacidade da madeira / Denise Ortigosa Stolf. -- São
Carlos, 2000.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos/Instituto de Física de São Carlos/Instituto de
Química de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.

Área Interunidades: Ciência e Engenharia de
Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr.

1. Tenacidade. 2. Densidade. 3. Propriedade de
resistência. I. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Ciência e Engenharia de Materiais

Caixa Postal, 369 - CEP 13560-970 - São Carlos - SP - Brasil

Tel.: (0xx16) 273-9589 - Fax: (0xx16) 273 9777 E-mail: erica@if.sc.usp.br

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
DENISE ORTIGOSA STOLF APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO INTERUNIDADES, ÁREA EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS, DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 23/10/2000.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. *FRANCISCO ANTONIO ROCCO LAHR* - EESC/USP (Orientador)

Prof. Dr. *GERALDO BORTOLETTO JÚNIOR* - ESALQ/USP

Profa. Dra. *AKEMI INO* - EESC/USP

Aos meus pais Luiz Roberto e Maria
Eloiza, minhas irmãs Patricia e
Adriana, e meu namorado Weber
pelo amor, carinho, compreensão e
incentivo em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Francisco Antonio Rocco Lahr, por todo o auxílio, incentivo, compreensão e paciência nos momentos difíceis, e por toda a amizade e carinho nos demais momentos, que foram fundamentais para que esse trabalho se concretizasse.

À amiga Érica, da Seção de Pós-Graduação da Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, pelos conselhos e apoio em todos os sentidos.

Ao meu tio Mário, pela ajuda em um momento fundamental da elaboração deste trabalho.

A todos os professores, funcionários e colegas do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), pela boa vontade manifestada em todos os momentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos concedida, que revelou-se fundamental para que o trabalho fosse realizado.

À minha família, namorado e amigos, por todos os conselhos e sacrifícios feitos durante o período em que o trabalho foi realizado.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a conclusão deste trabalho.

PUBLICAÇÃO

O artigo "Influence of density and moisture content in toughness of tropical woods", foi submetido à avaliação, tendo sido aprovado para apresentação na IX Reunión e Primer Congreso Iberoamericano de Investigacion e Desarrollo en Productos Forestales, a ser realizado em Concepción, Chile, nos dias 18 a 20 de outubro de 2000.

INFLUENCE OF DENSITY AND MOISTURE CONTENT IN TOUGHNESS OF TROPICAL WOODS

Denise Ortigosa Stolf¹, Francisco Antonio Rocco Lahr²

¹ Master in Science and Engineering of Materials, Wood and Timber Structures Laboratory (LaMEM), Department of Structural Engineering (SET), São Carlos Engineering School (EESC), São Paulo University (USP), e-mail: stolf@sc.usp.br

² Professor, LaMEM/SET/EESC/USP, e-mail: frocco@sc.usp.br

Keywords

Wood; Toughness; Moisture Content; Density.

Abstract

Wood often exhibits different behavior, depending on the kind of acting forces. Generally, wood can resist greater solicitations if short time intervals are considered. The mechanical property involved in these cases is the toughness, which values are determined in impact bending tests. Several basic uses of timber depend on the toughness, property not widely studied to tropical species grown in Brazil. This work, conducted in Wood and Timber Structures Laboratory (LaMEM), Department of Structural Engineering (SET), São Carlos Engineering School (EESC), São Paulo University (USP), aims to: a. determine the relation between toughness and wood density at 12% of moisture; b. determine the relation between toughness and moisture content (0 – 30%). In order to reach the first object, experimental results related to thirty six tropical species (density range 0,55 – 1,05 g/cm³) were considered, no less than twelve specimens for specie. To reach the second object, essences like Angelim Saia (*Vatairea sp*), Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*), Eucalipto Grandis (*Eucalyptus grandis*), Pinus Elliottii (*Pinus elliottii*), were employed, with well-sampled and climatized specimens, thirty for specie. All tests were conducted using 2cm x 2cm x 30cm specimens, according to the indications of Annex B of the Brazilian Standard to the Design of Timber Structures (NBR 7190/1997). Conclusions are interesting contributions to facilitate the required evaluation to improve wood applications, in cases where toughness parameters are fundamental.

Introduction

A tough piece of wood is one that sustains large deformation in bending or twisting before rupture. However, strict usage has reserved the term for a particular mechanical property to classify wood under the action of an impact load that causes failure, BODIG & JAYNE (1992). A ductile material that offers the same resistance than a non-ductile material, needs more energy to failure, exhibiting a higher toughness value, VAN VLACK (1989). Toughness is the work required to break a given specimen under an impact load, that is, it's the capacity of the material in absorbing energy at plastic zone.

Knowledge of physical and mechanical properties of wood makes possible its better use. Since there are difficulties in doing tests to characterize the species, many times wood is applied without knowing its basic properties, resulting in a bad usage and loss. Special importance is regarded on studying behavior of wood, considering need of knowing its performance when it is impacted under dynamical actions to its appropriate dimensioning of structural elements, furniture and packaging.

Toughness provides precious tools to evaluate the behavior of wood under dynamical actions. Measurements of toughness are attained from impact bending tests. One of them will be described in details at the following items of this paper.

This work, conducted in Wood and Timber Structures Laboratory, Department of Structural Engineering, São Carlos Engineering School, São Paulo University, aims to:

- a. determine the relation between toughness and wood density at 12% of moisture;
- b. determine the relation between toughness and moisture content (0 – 30%). Both subjects are related to tropical wood species.

Specific gravity

The specific gravity is a very good index for predicting the strength and elastic properties of wood, PANSKIN & ZEEUW (1980). KOEHLER (1933), investigating the causes of brashness in wood by averaging the results of a FPL-pendulum machine, also reported that the bigger the specific gravity ρ of wood is, bigger will be the toughness, and the relationship between toughness and specific gravity can be conveniently expressed by a parabolic function.

KOLLMANN (1941) obtained measurements for 1500 impact bending tests on Ashwood. The curve that describes the relationship between toughness and specific gravity may be fitted by a straight line, but a cubic parabola ($a=2,33 \rho^3$) fits better.

GHELMETZIU (1937/38), apud KOLLMANN & CÔTÉ (1968), testing specimens of Spruce, Pine, Beech, and Oak having 11 to 12% moisture content with the Amsler pendulum hammer, obtained important results expressed by Equation 1.

$$a = c(\rho_u)^n \quad (1)$$

♦ where:

a = impact work.

c = varies between 1,5 and 2,1.

n = usually are 2, except for Oak and Ash.

ρ_u = specific gravity at moisture content u .

Moisture content

Changes in moisture content below the fiber saturation point result in changes in the physical and mechanical properties of wood, with higher values at the lower moisture contents, except those properties related to impact like, for instance, toughness, that may remain the same or may actually decrease at the lower moisture content, according to FAHERTY & WILLIAMSON (1989). The well-known publication WOOD HANDBOOK (1987) indicates that an average increase in the height drop causing complete failure in impact bending per 1% decrease in moisture content is given by the value 0,5%. The same value is considered valid for work to maximum load in static bending.

Wood deformation is directly proportional to changes in moisture content. GHELMETZIU (1937/38), apud KOLLMANN & CÔTÉ (1968), shows that toughness is independent of moisture content in the range between 10 and 20%, as shown in Figure 1.

Figure 1- Effect of moisture content on the impact work.
From: GHELMETZIU (1937/38) apud KOLLMANN & CÔTÉ (1968).

Studies done by EWING & WILLIAMS (1979) in specimens of Scots Pine (*Pinus sylvestris*), under toughness testing, with a moisture content in the range between 0 and 20% showed that toughness doesn't change significant in this range of moisture content. This was also observed for MARKWARDT & WILSON (1935).

Materials and methods

Materials

Wood species utilized in this paper were obtained from Brazilian States Mato Grosso and Rondônia, at north and center-east of the country. The specimens were prepared in the carpentry of LAMEM-SET. To determine the correlation between wood toughness and specific gravity at reference moisture content (12%), the tests results obtained for the wood species mentioned at Table 1 were considered. To study the moisture content influence in wood toughness, Angelim Saia (*Vatairea* sp), Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*), Eucalipto Grandis (*Eucalyptus grandis*) and Pinus Elliottii (*Pinus elliottii*) were employed.

Table 1 – Wood species considered and its scientific names

Vulgar name	Scientific name
Angelim Amargoso	<i>Vatairea fusca</i>
Angelim Araroba	<i>Vataireopsis araroba</i>
Angelim Ferro	<i>Hymenolobium</i> sp
Angelim Pedra	<i>Hymenolobium paetrum</i>
Angelim Pedra Verdadeiro	<i>Dinizia excelsa</i>
Angico Preto	<i>Piptadenia macrocarpa</i>
Branquilio	<i>Terminalia</i> sp
Cafearana	<i>Andira</i> sp
Cambará Rosa	<i>Erisma</i> sp
Casca Grossa	<i>Ocotea odorifera</i>
Castelo	<i>Gossypiospermum praecox</i>
Catanudo	<i>Calophyllum</i> sp
Cedro Amargo	<i>Cedrela odorata</i>
Cedro Doce	<i>Cedrela</i> sp
Cedrorana	<i>Cedrelinga catenaeformis</i>
Copaíba	<i>Copaifera</i> sp
Cupiúba	<i>Goupia glabra</i>
Cutiúba	<i>Qualea paraensis</i>
Garapa	<i>Apuleia leiocarpa</i>
Guaiçara	<i>Luetzelburgia</i> sp
Guarucaia	<i>Peltophorum vogelianum</i>
Ipê	<i>Tabebuia serratifolia</i>
Itaúba	<i>Mezilaurus itauba</i>
Jatobá	<i>Hymenaea</i> sp
Louro Preto	<i>Ocotea</i> sp
Maçaranduba	<i>Manilkara</i> sp
Mandioqueira	<i>Qualea</i> sp
Oiticica Amarela	<i>Clarisia racemosa</i>
Oiuchu	<i>Rapanea</i> sp
Pau-óleo	<i>Copaifera</i> sp
Piolho	<i>Tapirira guianensis</i>
Quarubarana	<i>Erisma uncinatum</i>
Rabo de Arraia	<i>Vochysia</i> sp
Sucupira	<i>Diptotropis</i> sp
Tatajuba	<i>Bagassa guianensis</i>
Umirana	<i>Qualea retusa</i>

Methods

Indications of the Annex B from NBR 7190/1997 – Brazilian Code to the Design of Timber Structures were followed to determine the specific gravity and impact bending strength. Recommendations of ASTM D143-52 were adopted to determine wood toughness.

Experimental proceedings

The correlation between toughness and specific gravity at 12% of moisture content was determined based on the results of tests conducted according NBR 7190/1997, which specimens were obtained from commercial pieces. To determine the influence of moisture content in wood toughness, clean bars with nominal dimensions 2cm x 2cm x 200cm (radial, tangential and axial directions) were cut from the commercial pieces. The mentioned bars were cut in six adjacent 2cm x 2cm x 30cm specimens to promote the tests. Figure 2 shows details of positions. One of the specimens was used as reference to the moisture content. The weight of the five remaining specimens were controlled in order to reach moisture contents near 0%, 6%, 12%, 20% and 30%, to realize the tests.

Figure 2: Scheme of obtaining specimens.

Toughness tests values were obtained according to the procedures commented in the following items. Corrections casually necessary to those values were done using indications of DROW et al. (1965).

Procedures to the determination of toughness

Tests were done at the equipment developed for SIQUEIRA (1986), based on the machine from Forest Products Laboratory (FPL). The equipment must be adjusted before testing. It is recommended that the complete failure of the specimen occurs. Initial angle θ_i can be of 30° , 45° or 60° . After the specimen fails, the pendulum attains the final angle θ_a , shown at the Figure 3. When the difference between the initial and final angles is lower than 10° ($\theta_a - \theta_i < 10^\circ$), one has good results as WANGAARD (1950). For adjusting of the machinery, it's necessary to use a known mass and alter its position in the arm.

Figure 3- Principle of pendulum impact used to evaluate toughness.
From: SIQUEIRA(1990).

The center of mass, CG , shown at Figure 3, is at a distance l from the pivot point O . At the start of motion, the center of mass is located at an initial height h_i in relation to its lowest point, the pendulum is allowed to swing freely, and the load is applied in the specimen through a flexible chain, that is fixed around a drum mounted on the axis of the pendulum. Since there is absorption of part of the energy contained in the pendulum, by the specimen when it fails, this attains a height h_a at the end of motion.

Difference between the energy contained in the pendulum before and after the impact, results in the necessary energy to cause failure in this specimen.

One knows that the configuration of the system, in this work the pendulum, changes as time goes by. Kinetic energy U_K of the system increases when the pendulum is left from initial height h_i until it attains its lowest position, where it has its maximum kinetic energy. After it starts decreasing and returns to its minimum again when the pendulum attains its final height h_a .

It's possible to say that when the kinetic energy U_k changes of ΔU , while its configuration changes, its potential energy U_p changes of an equal and opposite amount, this implies that summing both variables must result null.:

$$\Delta U_K + \Delta U_P = 0 \quad (2)$$

In this case, $W = \Delta U$, where W is the work required for wood to fail. Linking the work-energy theorem with Equation 2 results:

$$W = \Delta U_K = -\Delta U_P \quad \text{or} \quad W = -\Delta U_K = \Delta U_P \quad (3)$$

Now it is possible to evaluate toughness W or the energy absorbed by the specimen, using the difference of kinetic energy U_K or of potential energy U_P . In this case, it's used the second option:

$$W = \Delta U_P = U_{P_a} - U_{P_i} \quad (4)$$

$$W = Bh_a - Bh_i = B(h_a - h_i) \quad (5)$$

♦ Heights h_a e h_i may be expressed in terms of the angles θ_a e θ_i :

$$h_a = l - l \cos \theta_a = l(1 - \cos \theta_a) \quad (6)$$

$$h_i = l - l \cos \theta_i = l(1 - \cos \theta_i) \quad (7)$$

♦ Finally, the expression for toughness W is:

$$W = B l (\cos \theta_a - \cos \theta_i) \quad (8)$$

where

W - toughness (Ncm) or (Nm).

B - weight of pendulum (N).

l - distance of rotation center from arm to the center of mass of the pendulum (cm) or (m).

θ_i - initial angle ($^\circ$).

θ_a - final angle of pendulum from vertical (AO), after failure of the specimen under test. ($^\circ$).

To obtain toughness W it's necessary to know: weight B of the pendulum, distance l of rotation axis to the center of mass CG and angles θ_a and θ_i .

For small changes at the cross-section of the specimens, but with a constant distance between supports, it may be considered a linear relationship between cross-section dimension and toughness, as mentioned by DROW et al. (1965). Based on this relationship, test results can be adjusted to a standard cross-section A utilizing Equation 9:

$$W_{s \tan d} = \frac{A_{s \tan d}}{A_{test}} W_{test} \quad (9)$$

where:

➤ A_{test} = cross-sectional area of test specimen.

➤ $A_{s \tan d}$ = cross-sectional area of stand specimen.

➤ W_{test} = toughness of test specimen.

➤ $W_{s \tan d}$ = adjusted toughness of specimen.

Results and discussion

Relation between toughness and specific gravity at the reference moisture content (12%)

The tests results were condensed in table 2 and the correspond graphic is showed in Figure 4.

Table 2: Wood species, specific gravity and toughness

Wood specie	Specific gravity (g/cm^3)	Toughness (Nm)
Angelim Amargoso	0,77	96
Angelim Araroba	0,67	69
Angelim Ferro	1,17	174
Angelim Pedra	0,69	88
Angelim Pedra Verdadeiro	1,13	198
Angico Preto	0,89	146
Branquilha	0,81	92
Cafearana	0,68	74
Cambará Rosa	0,67	33
Casca Grossa	0,79	122
Castelo	0,76	140
Catanudo	0,80	131
Cedro Amargo	0,51	46
Cedro Doce	0,50	53
Cedrorana	0,57	45
Copaíba	0,70	59
Cupiúba	0,85	67
Cutiúba	1,15	162
Garapa	0,92	144
Guaíçara	1,09	228
Guarucuia	0,92	127
Ipê	1,06	150
Itaúba	0,91	145
Jatobá	1,08	202
Louro Preto	0,68	67
Maçaranduba	1,14	197
Mandioqueira	0,85	119
Oiticica Amarela	0,76	134
Oiuchu	0,93	174
Pau-óleo	0,70	61
Piolho	0,83	145
Quarubarana	0,54	49
Rabo de Arraia	0,72	74
Sucupira	1,10	172
Tatajuba	0,94	97
Umirana	0,71	52

Figure 4- Effect of specific gravity on toughness of tropical woods.

The following relation is obtained:

$$W = c(\rho_u)^n \quad (10)$$

$$W = 152,17 \rho_u^{1,93} \quad (11)$$

It's important to register that this equation follows the same pattern of the conclusion expressed by GHELMEZIU (1937/38), studying species of North Hemisphere, apud KOLLMANN & CÔTÉ (1968).

So, the exponential relation between the mentioned variables can be considered very satisfactory.

Relation between toughness and moisture content

Because of the results presented by FAHERTY & WILLIAMSON (1989), the experimental tests to evaluate the relations between toughness and moisture content. It was chosen the interval 0 to 30% and the results obtained to Angelim Saia, Eucalipto Citriodora, Eucalipto Grandis and Pinus Elliottii were considered. The specific gravity of these species varies from 0,6 to 1,0 g/cm³. Figures 5, 6, 7 and 8 show the correspondent test results. The y-axis represent the relation between toughness at u% and toughness at 0% (moisture content). This option is justified because the subject is to verify the existence (or not) of a pattern of correlation among the involved variables, with no necessity of knowing the proper value of toughness.

The analysis of the graphics of figures 5 to 8 indicates that toughness variation with moisture content doesn't follow a particular pattern.

Figure 5- Effect of moisture content on toughness, for Angelim Saia.

Figure 6- Effect of moisture content on toughness, for Eucalipto Citriodora.

Figure 7- Effect of moisture content on toughness, for Eucalipto Grandis.

Figure 8- Effect of moisture content on toughness, for Pinus Elliottii.

Conclusion

The experimental results considered in this work permit the following conclusions:

a. The expression

$$W = 152,17 \rho_u^{1,93}$$

is valid to relate toughness to specific gravity, especially to Brazilian tropical woods.

b. The relationship between wood toughness and moisture content cannot be represented by a particular pattern.

Bibliography

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). NBR 190 - Projeto de estruturas de madeira Rio de Janeiro.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1981). ASTM D143-52 - Standard methods of testing small clear specimens of timber, Part 22. In: Annual book of ASTM standards. Philadelphia, PA.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. (1992). Mechanical of wood and wood composites. New York, Van Nostrand Reinhold.

DROW, J.T.; MARKWARDT, L.J.; YOUNGQUIST, W.G (1965). Results of impact tests to compare the pendulum impact and toughness test methods. U. S. For. Prod. Lab. Rep., n.2109.

EWING, P.D.; WILLIAMS, J.G. (1979). Thickness and moisture effect in the fracture toughness of Scots Pine. J. Mater. Sci., v.14, n.12, p.2959-2966.

FAHERTY, K.F.; WILLIAMSON, T.G. (1989). Wood engineering and construction handbook. McGraw-Hill Publishing Company, 1989.

FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987). Wood Handbook : Wood as an engineering material. Agric. Handb. 72. Washington, D.C., USA.

KOEHLER, A. (1933). Causes of brashness in wood. U. S. Dep. Agr. Tech. Bull., n.342, Washington, D.C.

KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ, W.A. (1968). Principles of wood science and technology: Solid wood. Springer Verlag.

MARKWARDT, L.J.; WILSON, T.R.C. (1935). Strength and related properties of woods grown in the United States. U. S. Dep. Agr. Tech. Bull., Washington, D.C., n.479, p.67.

PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C. (1980). Textbook of wood technology. McGraw Hill, New York.

SIQUEIRA, M.L. (1986). Projeto e construção de máquina para determinação da tenacidade de madeira. São Carlos, 103p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

VAN VLACK, L.H. (1989). Elements of materials science and engineering. 6.ed., Addison, Wesley Publishing Company.

WANGAARD, F.F. (1950). The mechanical properties of wood. John Wiley & Sons, Inc.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS.....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiii
RESUMO.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
1- Introdução.....	1
2- Objetivos.....	3
3- Revisão bibliográfica.....	5
3.1- Comportamento dinâmico.....	5
3.1.1- Considerações gerais.....	5
3.1.2- Impacto.....	6
3.1.2.1- Força de impacto.....	6
3.1.2.2- Energia de impacto.....	8
3.1.2.3- Trabalho e impulso.....	9
3.2- Tenacidade.....	11
3.3- Determinação da tenacidade: equipamentos e métodos.....	14
3.3.1- Flexão dinâmica - "Hatt-Turner Test".....	14
3.3.2- Teste Izod.....	16
3.3.3- Pêndulo de Charpy.....	16
3.4- Procedimentos para a determinação da tenacidade.....	19
3.5- Fatores que afetam a tenacidade.....	22
3.5.1- Inclinação das fibras.....	22
3.5.2- Densidade.....	24
3.5.3- Teor de umidade.....	26
3.5.4- Temperatura.....	27
3.5.5- Propriedades anatômicas da madeira.....	29
3.5.6- Variação das dimensões dos corpos-de-prova.....	30
3.5.7- Anéis de crescimento, posição na árvore e lignificação.....	31

3.5.8- Degradação.....	32
3.5.9- Impregnação com polímero.....	33
3.5.10- Outro casos.....	35
3.6- Correlação entre tenacidade de dicotiledôneas e densidade específica.....	35
3.7- Fenômeno de ruptura e seus tipos.....	37
3.8- Documentos normativos.....	38
3.9- Considerações finais sobre a revisão bibliográfica.....	39
4- Materiais e métodos.....	40
4.1- Avaliação da variação da tenacidade ao longo do comprimento de barras de madeira.....	40
4.2- Avaliação da influência da orientação dos anéis de crescimento na tenacidade da madeira.....	45
4.3- Avaliação da influência da umidade na tenacidade da madeira.....	46
4.4- Determinação da variabilidade dos valores da tenacidade da madeira....	48
4.5- Determinação da relação entre a densidade e a tenacidade da madeira.....	50
4.6- Determinação da relação entre a tenacidade e a resistência da madeira à..... compressão paralela às fibras.....	50
4.7- Determinação da relação entre a tenacidade e a resistência convencional..... da madeira no ensaio de flexão estática.....	50
5- Resultados e discussão.....	52
5.1- Avaliação da variação da tenacidade ao longo do comprimento de barras de madeira.....	52
5.1.1- Justificativa.....	52
5.1.2- Apresentação dos resultados.....	53
5.1.3- Análise dos resultados.....	56
5.1.3.1- Comparação de médias.....	56
5.1.3.2- Comparação de pares.....	58
5.1.4- Outras considerações.....	60
5.2- Avaliação da influência da orientação dos anéis de crescimento na tenacidade da madeira.....	60
5.2.1- Justificativa.....	60
5.2.2- Apresentação dos resultados.....	61
5.2.3- Análise dos resultados.....	64

5.2.3.1- Comparação de médias.....	64
5.2.3.2- Comparação de pares.....	66
5.2.4- Outras considerações.....	67
5.3- Avaliação da influência da umidade na tenacidade da madeira.....	67
5.3.1- Justificativa.....	67
5.3.2- Apresentação dos resultados.....	68
5.3.3- Análise dos resultados.....	73
5.3.4- Outras considerações.....	75
5.4- Determinação da variabilidade dos valores da tenacidade da madeira.....	76
5.4.1- Justificativa.....	76
5.4.2- Apresentação dos resultados.....	76
5.4.3- Análise dos resultados.....	77
5.4.4- Outras considerações.....	78
5.5- Determinação da relação entre a densidade e a tenacidade da madeira.....	78
5.5.1- Justificativa.....	78
5.5.2- Apresentação dos resultados.....	78
5.5.3- Análise dos resultados.....	80
5.5.4- Outras considerações.....	81
5.6- Determinação da relação entre a tenacidade e a resistência da madeira à.....	
compressão paralela às fibras.....	82
5.6.1- Justificativa.....	82
5.6.2- Apresentação dos resultados.....	82
5.6.3- Análise dos resultados.....	84
5.6.4- Outras considerações.....	85
5.7- Determinação da relação entre a tenacidade e a resistência convencional.....	
da madeira no ensaio de flexão estática.....	85
5.7.1- Justificativa.....	85
5.7.2- Apresentação dos resultados.....	85
5.7.3- Análise dos resultados.....	87
5.7.4- Outras considerações.....	88
6- Conclusões.....	89
7- Anexo.....	92
8- Referências bibliográficas.....	96

9- Bibliografia complementar.....	100
-----------------------------------	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Contorno da força desenvolvida na madeira durante o impacto.....	10
Figura 2- Diagrama de impulso: a) diferentes impulsos resultando forças máximas iguais, b) impulsos iguais resultando diferentes forças máximas.....	11
Figura 3- Dependência da tensão no limite de proporcionalidade (curva A) e do módulo de ruptura (curva B) pelo logaritmo da duração da carga para a Sitka Spruce (<i>Picea sp</i>).....	12
Figura 4- Diagrama de deformação sob carga para flexão estática na madeira em vários teores de umidade; a) totalmente seca, b) seca ao ar, c) umidade igual ou superior ao ponto de saturação das fibras.....	13
Figura 5- Esquema da máquina para o teste de Flexão Dinâmica.....	15
Figura 6- Esquema do aparato para os testes de impacto de Izod e Charpy.....	17
Figura 7- Máquina tipo AMSLER.....	18
Figura 8- Máquina tipo FLP.....	18
Figura 9- Detalhe da máquina tipo AMSLER.....	19
Figura 10- Detalhe da haste que permite o ajuste da cabeça do pêndulo.....	21
Figura 11- Variação da tenacidade com o ângulo entre o eixo do corpo-de-prova e a direção da fibra.....	23
Figura 12- Efeito da densidade sobre o trabalho de impacto para Spruce (<i>Picea sp</i>), Pinus (<i>Pinus sp</i>), Beech (<i>Nothofagus sp</i>) e Oak (<i>Quercus sp</i>).....	25
Figura 13- Efeito do teor de umidade no trabalho de impacto.....	27
Figura 14- Efeito da temperatura no trabalho de impacto para o <i>Pinus sp</i> com diferentes densidades, em condições seco ao ar e próximo a verde.....	28
Figura 15- Comparação entre a deformação de corpos-de-prova de <i>Tilia Americana</i> tratada e não tratada, no teste de flexão.....	34
Figura 16- Tenacidade de dicotiledôneas com aproximadamente 12% de umidade versus densidade básica. A linha sólida representa a Eq.(26).....	36
Figura 17- Tipos de ruptura em amostras de madeira depois do ensaio de impacto (tenacidade): a) Madeira com alta resistência ao impacto (ruptura espalhada), b) Madeira com resistência intermediária ao impacto (ruptura concentrada), c) Madeira frágil.....	37

Figura 18- Máquina Universal AMSLER.....	41
Figura 19- Máquina desenvolvida por Siqueira (1986) para a determinação da tenacidade.....	42
Figura 20- Posição dos anéis de crescimento em relação às arestas dos corpos-de-prova.....	42
Figura 21- Retirada dos corpos-de-prova para ensaio com o impacto provocando tração nas fibras mais próximas à medula (Posição I).....	43
Figura 22- Retirada dos corpos-de-prova para ensaio com o impacto provocando tração nas fibras mais próximas à casca (Posição II).....	44
Figura 23- Retirada dos corpos-de-prova para ensaio com o impacto provocando tração na face radial do corpo-de-prova (Posição III).....	44
Figura 24- Esquema de retirada dos corpos-de-prova para o estudo da influência da orientação dos anéis de crescimento na tenacidade da madeira.....	46
Figura 25- Esquema da retirada dos corpos-de-prova para o estudo da influência da umidade na tenacidade da madeira.....	47
Figura 26- Ruptura do corpo-de-prova de tenacidade.....	53
Figura 27- Tenacidade em função da umidade, para o Angelim Saia.....	73
Figura 28- Tenacidade em função da umidade, para o Eucalipto Citriodora.....	73
Figura 29- Tenacidade em função da umidade, para o Eucalipto Grandis.....	73
Figura 30- Tenacidade em função da umidade, para o Pinus Elliottii.....	73
Figura 31- W_u/W_0 em função da umidade, para o Angelim Saia.....	74
Figura 32- W_u/W_0 em função da umidade, para o Eucalipto Citriodora.....	74
Figura 33- W_u/W_0 em função da umidade, para o Eucalipto Grandis.....	74
Figura 34- W_u/W_0 em função da umidade, para o Pinus Elliottii.....	74
Figura 35- Gráfico do logaritmo da tenacidade contra o logaritmo da densidade.....	80
Figura 36- Efeito da densidade na tenacidade de espécies tropicais.....	81
Figura 37- Gráfico da tenacidade contra a resistência à compressão paralela às fibras.....	84
Figura 38- Gráfico da tenacidade contra a resistência convencional no ensaio de flexão estática.....	87
Figura 39- Esquema da máquina desenvolvida por Siqueira.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Espécies empregadas- Objetivo 1.....	40
Tabela 2- Espécies empregadas- Objetivo 2.....	45
Tabela 3- Espécies empregadas- Objetivo 3.....	46
Tabela 4- Espécies empregadas - Objetivos 4 a 7.....	48
Tabela 5- Tenacidade ao longo do comprimento da barra, com o impacto provocando tração nas fibras mais próximas à medula (Posição I).....	53
Tabela 6- Tenacidade ao longo do comprimento da barra, com o impacto provocando tração nas fibras mais próximas à casca (Posição II).....	54
Tabela 7- Tenacidade ao longo do comprimento da barra, com o impacto provocando tração na face radial do corpo-de-prova (Posição III).....	54
Tabela 8- Tenacidades Relativas (Posição I).....	55
Tabela 9- Tenacidades Relativas (Posição II).....	55
Tabela 10- Tenacidades Relativas (Posição III).....	55
Tabela 11- Comparação de médias (Posição I).....	57
Tabela 12- Comparação de médias (Posição II).....	57
Tabela 13- Comparação de médias (Posição III).....	58
Tabela 14- Comparação de pares (Posição I).....	59
Tabela 15- Comparação de pares (Posição II).....	59
Tabela 16- Comparação de pares (Posição III).....	59
Tabela 17- Espécie Angelim Saia- Tenacidade nas posições I, II e III.....	61
Tabela 18- Espécie Eucalipto Citriodora- Tenacidade nas posições I, II e III.....	61
Tabela 19- Espécie Eucalipto Grandis- Tenacidade nas posições I, II e III.....	62
Tabela 20- Espécie Pinus Elliottii- Tenacidade nas posições I, II e III.....	63
Tabela 21- Comparação de médias (Posições I e II).....	65
Tabela 22- Comparação de médias (Posições I e III).....	65
Tabela 23- Comparação de médias (Posições II e III).....	65
Tabela 24- Comparação de pares (Posições I e II).....	66
Tabela 25- Comparação de pares (Posições I e III).....	66
Tabela 26- Comparação de pares (Posições II e III).....	66

Tabela 27- Espécie Angelim Saia- Tenacidade para umidade 0%.....	68
Tabela 28- Espécie Angelim Saia- Tenacidade para umidade 6%.....	68
Tabela 29- Espécie Angelim Saia- Tenacidade para umidade 12%.....	68
Tabela 30- Espécie Angelim Saia- Tenacidade para umidade 20%.....	69
Tabela 31- Espécie Angelim Saia- Tenacidade para umidade 30%.....	69
Tabela 32- Espécie Eucalipto Citriodora- Tenacidade para umidade 0%.....	69
Tabela 33- Espécie Eucalipto Citriodora- Tenacidade para umidade 6%.....	69
Tabela 34- Espécie Eucalipto Citriodora- Tenacidade para umidade 12%.....	70
Tabela 35- Espécie Eucalipto Citriodora- Tenacidade para umidade 20%.....	70
Tabela 36- Espécie Eucalipto Citriodora- Tenacidade para umidade 30%.....	70
Tabela 37- Espécie Eucalipto Grandis- Tenacidade para umidade 0%.....	70
Tabela 38- Espécie Eucalipto Grandis- Tenacidade para umidade 6%.....	71
Tabela 39- Espécie Eucalipto Grandis- Tenacidade para umidade 12%.....	71
Tabela 40- Espécie Eucalipto Grandis- Tenacidade para umidade 20%.....	71
Tabela 41- Espécie Eucalipto Grandis- Tenacidade para umidade 30%.....	71
Tabela 42- Espécie Pinus Elliottii- Tenacidade para umidade 0%.....	72
Tabela 43- Espécie Pinus Elliottii- Tenacidade para umidade 6%.....	72
Tabela 44- Espécie Pinus Elliottii- Tenacidade para umidade 12%.....	72
Tabela 45- Espécie Pinus Elliottii- Tenacidade para umidade 20%.....	72
Tabela 46- Espécie Pinus Elliottii- Tenacidade para umidade 30%.....	73
Tabela 47- Valores médios de W_u/W_0 , cinco níveis de umidade.....	75
Tabela 48- Coeficiente de variação- Espécies nativas.....	76
Tabela 49- Valores da tenacidade e da densidade ($u = 12\%$).....	79
Tabela 50- Valores da tenacidade e da resistência à compressão paralela às fibras ($u = 12\%$).....	83
Tabela 51- Valores da tenacidade e da resistência convencional da madeira obtida no ensaio de flexão estática ($u = 12\%$).....	86

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

AS	- Angelim Saia;
ASTM	- American Society for Testing and Materials;
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas;
cm	- centímetro;
CG	- centro de gravidade;
CV	- coeficiente de variação;
DIN	- Deutsch Institut für Normung;
EESC	- Escola de Engenharia de São Carlos;
EC	- Eucalipto Citriodora;
EG	- Eucalipto Grandis;
EL	- Pinus Elliottii;
FPL	- Forest Product Laboratory;
J	- Joule;
in	- polegada
ISO	- International Standard Organization;
kg	- quilograma;
LaMEM	- Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira;
lb	- libra;
m	- metro;
mm	- milímetro;
N	- Newton;
NBR	- Norma Brasileira Registrada;
PL	- limite de proporcionalidade;
rad	- radiano;
s	- segundo;
SET	- Departamento de Engenharia de Estruturas;
SI	- Sistema Internacional;
TR	- tenacidade relativa;

LISTA DE SÍMBOLOS

a	- aceleração; trabalho de impacto;
a'	- aceleração angular;
A	- área da seção transversal;
A_{teste}	- área da seção transversal do corpo-de-prova em teste;
$A_{padrão}$	- área da seção transversal do corpo-de-prova padrão;
A_b	- trabalho antes da ruptura;
A_a	- trabalho após a ruptura;
B	- peso de um corpo; peso do martelo;
d	- deformação causada pelo martelo quando ele atua como uma carga estática;
dt	- diferencial de tempo;
du	- diferencial de deslocamento;
dv	- diferencial de velocidade;
dv'	- diferencial de velocidade angular;
$d\theta$	- diferencial de deslocamento angular;
D	- altura de queda do martelo em relação à posição de repouso do mesmo;
$f_{c_0,12}$	- resistência à compressão paralela às fibras, à umidade de 12%;
$f_{m,12}$	- resistência convencional no ensaio de flexão estática, à umidade de 12%;
g	- aceleração da gravidade;
G	- densidade específica;
h	- altura de um corpo;
h_i	- altura inicial do centro de massa do braço do pêndulo;
h_0	- altura final do centro de gravidade do braço do pêndulo, se o mesmo for solto livremente;
h_a	- altura final do centro de gravidade do braço do pêndulo, considerando o impacto;
H	- altura total de queda do martelo;
J_t	- momentum de um corpo;

K	- constante de proporcionalidade dependendo da propriedade de resistência;
l	- distância do centro de gravidade ao eixo de rotação do pêndulo;
L	- distância entre apoios;
m	- massa de um corpo;
n	- expoente; número de dados em uma amostra;
n_x	- número de elementos da amostra x ;
n_y	- número de elementos da amostra y ;
O	- eixo de rotação do pêndulo;
P	- força aplicada sobre um corpo;
$P_{\max}$	- força máxima aplicada a um corpo;
R^2	- coeficiente de correlação;
S	- qualquer propriedade de resistência; corpo-de-prova;
s_x^2	- desvio padrão da amostra x ;
s_y^2	- desvio padrão da amostra y ;
t	- tempo; parâmetro da distribuição de Student para $n_x + n_y - 2$ graus de liberdade;
t_0	- tempo inicial;
u	- deslocamento de um corpo; umidade;
U_T	- energia total de um corpo;
U_K	- energia cinética de um corpo;
U_{K_0}	- energia cinética inicial;
U_{K_a}	- energia cinética final;
U_P	- energia potencial de um corpo;
U_{P_i}	- energia potencial inicial;
U_{P_a}	- energia potencial final;
v	- velocidade de um corpo;
v'	- velocidade angular;
v_0	- velocidade de um corpo antes do impacto;
v_a	- velocidade de um corpo após o impacto;

W	- tenacidade; trabalho realizado por ou sobre um corpo;
W_0	- tenacidade a 0% de umidade;
W_{12}	- tenacidade a 12% de umidade;
W_u	- tenacidade a $u\%$ de umidade;
W_{teste}	- tenacidade do corpo-de-prova em teste;
$W_{padrão}$	- tenacidade do corpo-de-prova padrão;
$W_{//}$	- tenacidade paralela às fibras;
$W_{\perp}$	- tenacidade perpendicular às fibras;
W_{γ}	- tenacidade para um ângulo γ de inclinação das fibras;
x_i	- valor da i -ésima medida da amostra x ;
x_m	- média dos valores da amostra x ;
y	- deformação adicional causada pelo impacto;
y_i	- valor da i -ésima medida da amostra y ;
y_m	- média dos valores da amostra y ;
ΔU	- variação de energia;
ΔU_K	- variação de energia cinética;
ΔU_P	- variação de energia potencial;
α	- ângulo entre os valores da carga e da deformação, até o limite elástico; ângulo formado entre o braço do pêndulo (em sua posição inicial) e a vertical, quando este for solto livremente;
β	- ângulo formado entre o braço do pêndulo (em sua posição final) e a vertical, quando este for solto livremente;
δ	- ângulo formado entre o braço do pêndulo (após o impacto) e a vertical;
γ	- ângulo de inclinação das fibras;
θ	- ângulo;
θ_a	- ângulo final do pêndulo;
ρ	- densidade;
ρ_u	- densidade da amostra a uma umidade u ;
ρ_{12}	- densidade à umidade de 12%.

RESUMO

A madeira apresenta diferentes comportamentos, dependendo das solicitações às quais está sujeita. Em geral, a madeira pode resistir a solicitações de maior magnitude se a ação ocorre num curtíssimo intervalo de tempo. A propriedade mecânica envolvida nestes casos é a tenacidade, cujos valores são determinados em ensaios de impacto na flexão. Diversas aplicações relacionadas à madeira dependem da mencionada propriedade, não muito estudada para as madeiras usualmente empregadas no Brasil. Com o intuito de preencher tais lacunas o presente trabalho foi realizado para avaliar a influência da umidade e da orientação dos anéis de crescimento da madeira no valor da sua tenacidade. Para isso foram utilizadas as espécies Angelim Saia (*Vatairea sp*), Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*), Eucalipto Grandis (*Eucalyptus grandis*), Pinus Elliottii (*Pinus elliottii*), com corpos-de-prova convenientemente amostrados e climatizados. Além disso foram quantificadas as relações entre: a tenacidade e a densidade da madeira a 12% de umidade; a tenacidade e a resistência da madeira à compressão paralela às fibras; a tenacidade e a resistência convencional da madeira no ensaio de flexão estática. Para isto foram considerados os resultados obtidos para trinta e seis espécies tropicais brasileiras, sendo no mínimo doze amostras por espécie.

ABSTRACT

Wood often exhibits different behavior, depending on the kind of acting forces. Usually, wood can resist to greater solicitations if short time intervals are considered. The mechanical property involved in these situations is toughness, which values are determined in impact bending tests. Several basic uses of timber depend on the toughness, property not widely studied to tropical species grown in Brazil. This work, which was conducted to improve this situation, aimed to evaluate the influence of moisture content and grain angle in values of toughness. In order to reach these objects, species like Angelim Saia (*Vatairea sp*), Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*), Eucalipto Grandis (*Eucalyptus grandis*), Pinus Elliottii (*Pinus elliottii*), were employed, with well-sampled and climatized specimens. Besides, relationship between toughness and wood density at 12% of moisture, toughness and wood strength at compression parallel to the grain, toughness and modulus of rupture in static bending test were determined. To reach these subjects, results obtained for thirty six tropical species grown in Brazil, no less than twelve especimens for specie, were considered.

1- INTRODUÇÃO

A madeira tem sido muito utilizada pelo homem ao longo do tempo, estando diretamente relacionada à solução de problemas como a habitação; a travessia de obstáculos naturais e/ou artificiais; a construção de veículos para os diferentes meios de transporte; o armazenamento e o transporte de produtos agrícolas; a confecção de móveis e utensílios e a definição de artefatos esportivos, entre outros.

Entre as vantagens do uso da madeira podem ser destacadas: sua renovabilidade; facilidade de processamento - pode ser obtida em peças de grandes dimensões, facilmente desdobráveis para peças de dimensões compatíveis para diferentes aplicações; permite grande facilidade de ligações e emendas; apresenta condições naturais satisfatórias de isolamento térmico e absorção acústica; tem alta resistência em relação ao peso, custo competitivo quando comparada aos metais e cimentos.

Por outro lado, a madeira tem uma particularidade que requer cuidado e atenção dos profissionais envolvidos com suas aplicações: trata-se de material heterogêneo por natureza, e suas propriedades apresentam significativa variabilidade. Ao mesmo tempo, diversos aspectos do comportamento das milhares de espécies crescidas no Brasil não estão, ainda, adequadamente estabelecidas. Tudo isto evidencia a necessidade do desenvolvimento de numerosos estudos, para a geração de subsídios que reduzam as incertezas relacionadas ao uso da madeira.

O Brasil possui uma das mais vastas reservas de madeira nativa do mundo, localizada principalmente na Região Amazônica e, segundo informações fornecidas pela SUDAM (Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia), publicadas pelo INPE (1998), dispõe de um volume estimado superior a 20 bilhões de metros

cúbicos. Além disto, os recursos florestais provenientes das diversas áreas de reflorestamento são consideráveis, em especial das regiões sul e sudeste do país. Em São Paulo, de acordo com o Instituto Florestal do Estado (1994/95), aproximadamente 950 mil hectares se constituem em áreas de reflorestamento, dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. Esses dados evidenciam a grande disponibilidade de madeira do Brasil.

A disponibilidade fez o emprego da madeira tender à expansão, abrangendo cada vez mais novas possibilidades de aplicação, bem como consolidando áreas onde tradicionalmente o emprego da madeira já é consagrado. Neste contexto podem ser mencionadas: a indústria de construção civil, mais especificamente a construção de estruturas para diferentes finalidades: coberturas, pontes, passarelas, silos, cimbramentos e escoramentos; a indústria do mobiliário, com largo potencial de mercado interno e gradual expansão para o mercado externo; a indústria de embalagens, que vem se destacando como uma das que tem utilizado maior volume de madeira e de produtos derivados.

O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas da madeira possibilita seu melhor aproveitamento. Por causa de dificuldades em realizar ensaios para a caracterização de espécies, muitas vezes a madeira é utilizada sem o conhecimento básico de suas propriedades, levando assim ao desperdício desse material.

Especial importância recai sobre o estudo da madeira no que diz respeito ao seu desempenho quando solicitada a ações que provocam impacto, particularmente nas aplicações mencionadas acima. De muita utilidade será relacionar a tenacidade da madeira com parâmetros como umidade, densidade, posição dos anéis de crescimento, entre outras.

O presente trabalho se justifica pela argumentação apresentada e seu desenvolvimento ocorreu no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LAMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP) no âmbito da Área Interunidades de Ciência e Engenharia de Materiais, Campus USP, São Carlos.

2- OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral a geração de subsídios para ampliar o conhecimento a respeito da tenacidade da madeira, com ênfase às espécies tropicais crescidas no Brasil, em regiões periféricas da Floresta Amazônica, origem de parcela significativa da madeira empregada nos diversos segmentos da indústria de nosso país.

Como objetivos específicos, são mencionados:

- 2.1-** Avaliação da variação da tenacidade ao longo do comprimento de barras de madeira.
- 2.2-** Avaliação da influência da orientação dos anéis de crescimento na tenacidade da madeira.
- 2.3-** Avaliação da influência da umidade na tenacidade da madeira.
- 2.4-** Determinação da variabilidade dos valores da tenacidade da madeira.
- 2.5-** Determinação da relação entre a densidade e a tenacidade da madeira.
- 2.6-** Determinação da relação entre a tenacidade e a resistência da madeira à compressão paralela às fibras.

2.7- Determinação da relação entre a tenacidade e a resistência convencional da madeira no ensaio de flexão estática.

3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são discutidos vários aspectos relacionados ao tema central da dissertação. Desta forma, espera-se registrar a fundamentação bibliográfica adequada para o desenvolvimento das etapas que compõem o trabalho. Destaca-se que os assuntos relacionados mais diretamente à madeira, sua constituição anatômica, suas propriedades físicas e mecânicas, não foram abordados nesta revisão. Informações detalhadas a este respeito podem ser encontradas em Mainieri (1956), Harlow; Harrar (1958), Rawitscher (1964), Gemmel (1980), Hellmeister (1983), Rocco Lahr (1990), entre outros.

3.1- Comportamento dinâmico das partículas e dos corpos rígidos

3.1.1- Considerações gerais

O estudo do movimento dos corpos é feito por duas sub-áreas da Mecânica: a cinemática e a dinâmica. A cinemática trata do estudo do movimento das partículas e dos corpos rígidos. A dinâmica correlaciona o movimento com os fatores que o causam, Sears et al. (1985).

Define-se o impacto como sendo uma colisão rápida entre dois corpos, produzindo diferentes resultados, dependendo da intensidade das forças de colisão, segundo Bodig; Jayne (1992). Se as tensões causadas pela colisão forem pequenas, pode-se esperar uma reação predominantemente elástica. Para altas cargas de

impacto, entretanto, um ou mais corpos envolvidos na colisão podem danificar-se. Por exemplo, cargas de impacto em vigas de madeira podem induzir à ruptura.

Embora a resposta elástica e a resistência frequentemente recebam uma grande atenção na mecânica dos materiais, sua capacidade para dissipar energia e absorver carga de impacto pode ser de muita importância em várias aplicações, conforme registrou Smith (1998).

Elementos de madeira em aeronaves, embarcações, equipamentos esportivos, cabos de ferramentas, assim como em estruturas, falham frequentemente mais com o impacto do que sob carga estática, segundo Kollmann; Côté (1968). Tacos de baseball, cabos de armas, raquete de tênis, dormentes e estacas de madeira devem ser capazes de absorver e dissipar energia de impacto. Materiais para embalagem, como as caixas e os paletts, absorvem energia de impacto e, desse modo, previnem os danos na mercadoria embalada, de acordo com Bodig; Jayne (1992).

3.1.2- Impacto

3.1.2.1- Força de impacto

A velocidade v de um objeto é definida como a taxa de variação do deslocamento em relação ao tempo:

$$v = \frac{du}{dt}, \quad (1)$$

onde u é o símbolo para o deslocamento e t para o tempo. A aceleração é a taxa de variação da velocidade com o tempo:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2u}{dt^2}. \quad (2)$$

As Eq.(1) e Eq.(2) expressam a velocidade e a aceleração em um sistema de coordenadas retangulares. Em coordenadas polares a velocidade angular v' é a taxa de variação com o tempo de um ângulo θ :

$$v' = \frac{d\theta}{dt}; \quad (3)$$

a aceleração angular a' é:

$$a' = \frac{dv'}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}. \quad (4)$$

No Sistema Internacional (SI), a velocidade é expressa em metro (m)/segundo (s), a velocidade angular é dada em radiano (rad)/ s , a aceleração em m/s^2 e a aceleração angular em rad/s^2 .

Pela segunda Lei de Newton, a aceleração de um corpo é proporcional à força P aplicada sobre o mesmo e inversamente proporcional à massa m do corpo, segundo Resnick; Halliday (1985):

$$a \propto \left(\frac{P}{m} \right). \quad (5)$$

No SI, a constante de proporcionalidade é unitária. Assim, a Eq.(5) pode ser escrita como segue:

$$P = ma = m \left(\frac{dv}{dt} \right) = m \left(\frac{d^2u}{dt^2} \right). \quad (6)$$

O peso B de um corpo na Terra é a força induzida pela aceleração gravitacional g :

$$B = mg, \quad (7)$$

substituindo este resultado na Eq.(6), obtém-se:

$$P = \frac{B}{g} a = \frac{B}{g} \frac{dv}{dt} = \frac{B}{g} \frac{d^2 u}{dt^2}. \quad (8)$$

A unidade de massa no SI é o quilograma (kg). As forças são dadas em Newton (N), definido coma a atração exercida pela Terra sobre uma massa de um quilograma quando a aceleração gravitacional g é $9,80665 \text{ m/s}^2$.

3.1.2.2- Energia de impacto

A energia total U_T do movimento de um corpo é a soma da energia cinética U_K e da potencial U_P do mesmo :

$$U_T = U_K + U_P. \quad (9)$$

A energia pode ser definida como o produto entre a força e a distância através da qual a mesma age, segundo Bodig; Jayne (1992). Usando a definição da Eq.(6), uma expressão simples para a energia cinética pode ser obtida:

$$U_K = \int_0^u P du = m \int_0^u \frac{dv}{dt} du. \quad (10)$$

Considerando um deslocamento diferencial dado por $du = v dt$, Eq.(1), substituindo e mudando-se os limites de integração, resulta:

$$U_k = m \int_0^v \frac{dv}{dt} v dt = m \int_0^v v dv, \quad (11)$$

integrando, obtém-se a bem conhecida equação:

$$U_K = \frac{1}{2}mv^2, \quad (12)$$

A unidade de energia no SI é o Joule (J).

3.1.2.3- Trabalho e impulso

No caso da madeira, é possível obter uma medida da energia por ela absorvida valendo-se de um experimento simples envolvendo a observação das velocidades inicial e final de uma massa que colide com a amostra considerada, conforme registram Bodig; Jayne (1992). A massa m com uma velocidade v_o passará a se deslocar com uma velocidade v_a depois do impacto. A energia ou o trabalho absorvido pela amostra de madeira é a diferença entre a energia cinética da massa antes e depois do impacto:

$$W = -(U_{K_o} - U_{K_a}), \quad (13)$$

usando a Eq.(12), obtém-se:

$$W = -\left(\frac{1}{2}mv_o^2 - \frac{1}{2}mv_a^2\right) = -\frac{1}{2}m(v_o^2 - v_a^2). \quad (14)$$

Este conceito é usado no ensaio para a determinação da tenacidade, no qual a energia fornecida para a barra de madeira é grande o suficiente para causar ruptura.

A velocidade inicial do corpo de massa m , entretanto, pode ser insuficiente para causar a ruptura da peça de madeira que está sendo ensaiada, ainda que absorva toda a energia possível. A resposta da madeira durante o período de contato com a massa é análoga à mostrada na Figura (1). A área sob a curva Força x Tempo é definida como o *momentum*, denotado por J_t :

$$J_t = \int_{t_0}^t P dt, \quad (15)$$

substituindo-se pela força da Eq.(6):

$$J_t = \int_{t_0}^t m \frac{dv}{dt} dt = m \int_{v_0}^{v_a} dv, \quad (16)$$

ou,

$$J_t = m (v_a - v_0). \quad (17)$$

Figura 1- Contorno da força desenvolvida na madeira durante o impacto.
Fonte- Bodig; Jayne (1992).

A Eq.(17) representa a variação no momentum e é chamada *impulso*. Os mesmos picos de força podem causar diferentes impulsos, enquanto picos de força diferentes podem provocar o mesmo impulso, Figura (2). As forças máximas e a distribuição das mesmas em função do tempo fornecem a magnitude do impacto, de acordo com Bodig; Jayne (1992).

Figura 2- Diagrama de impulso: a) diferentes impulsos resultando forças máximas iguais, b) impulsos iguais resultando diferentes forças máximas.
Fonte- Bodig; Jayne (1992).

3.2- Tenacidade

A tensão provocada pelo impacto age somente em um curtíssimo intervalo de tempo, por exemplo, poucos microsegundos. A resposta da madeira à tensão de impacto é chamada resistência ao choque, segundo Kollmann; Côté (1968). Uma peça de madeira considerada tenaz é aquela que suporta grande deformação sob flexão ou torção antes de romper-se.

Usualmente tem-se restringido o uso do termo tenacidade a uma propriedade mecânica particular, para qualificar a madeira sob a ação de uma carga de impacto causando ruptura. Um material que oferece maior resistência à falha que outro terá um maior valor de tenacidade, de acordo com Van Vlack (1989).

A tenacidade tem sido usada para descrever características da madeira e seus derivados, estando relacionada com outras propriedades tais como resistência ao cisalhamento e resistência à tração normal às fibras. Entretanto, a tenacidade não deve ser considerada separadamente para caracterizar uma espécie, sendo necessária a avaliação conjunta dos resultados de outros testes, segundo John (1992).

Além disso, alterações nos valores da tenacidade são bons indicadores de qualquer deterioração ou anormalidades em peças estruturais de madeira. As relações entre a tenacidade e as características anatômicas da madeira têm sido objeto de detalhados exames, conforme registra Keith (1966).

Durante a flexão, as vigas solicitadas por um pequeno intervalo de tempo, com pancadas através de uma haste ou pelo impacto de um corpo deixado cair sobre as mesmas, oferecerão mais resistência à ruptura do que quando submetidas à ação estática. Markwardt; Heck (1938) chegaram a esta conclusão ensaiando cento e sessenta e quatro peças de diversas espécies norte-americanas de madeira.

Extrapolando os resultados obtidos por Markwardt (1941), apresentados na Figura (3), é mostrado que, para um curto intervalo de tempo, a viga, quando submetida a ação dinâmica, pode resistir a cerca de 150% da ação estática.

Tiemann (1951), com base no fato de que uma viga, sob teste de impacto na flexão, apresenta deformação cerca de duas vezes maior que no teste estático, sugere que a tensão de ruptura no impacto seja, também, aproximadamente o dobro em relação ao caso estático.

Figura 3- Dependência da tensão no limite de proporcionalidade (curva A) e do módulo de ruptura (curva B) pelo logaritmo da duração da carga para a Sitka Spruce (*Picea sp.*).

Fonte- Adaptada de Markwardt (1941).

A teoria para analisar o impacto na flexão é não é simples. Conceitos sobre o carregamento de impacto na madeira foram publicados por Krech¹ (1960) apud Kollmann; Côté (1968). A capacidade de um corpo resistir ao choque depende da sua capacidade de absorver a energia recebida e dissipá-la na forma de deformação, Askeland (1994). A partir daí, Van Vlack (1984) admite que, para muitas aplicações, os materiais tenazes são mais interessantes que os frágeis.

Bodig; Jayne (1992) definem tenacidade como o trabalho necessário para quebrar uma dada amostra à flexão sob uma carga de impacto. Monnin² (1932) apud Kollmann; Côté (1968) salientou que o trabalho da carga máxima é igual à energia total absorvida na flexão dinâmica, podendo ser afetado por diversos fatores. A Figura (4) mostra como esse trabalho W pode ser influenciado pela variação da umidade da amostra.

Figura 4- Diagrama de deformação sob carga para flexão estática na madeira em vários teores de umidade; a) totalmente seca, b) seca ao ar, c) umidade igual ou superior ao ponto de saturação das fibras.

Fonte- Monnin (1932) adaptada de Kollmann; Côté (1968).

¹ KRECH, H. Größe und zeitlicher Ablauf von Kraft und Durchbiegung beim Schlagbiegeversuch an Holz und ihr Zusammenhang mit der Bruchschlagarbeit, 1960.

² MONNIN, M. L'essai des bois. Krongreßbuch Zürich Int. Verb. Materialprüfung, 85p., 1932.

Na Figura (4), W = trabalho total, A_b = trabalho antes da ruptura, A_a = trabalho após a ruptura, α = ângulo entre os valores da carga e da deformação, até o limite elástico, PL = limite de proporcionalidade.

Nesta Figura e nas demais situações onde as unidades apresentadas não se referem ao SI, fez-se a opção de manter a informação conforme registro expresso dos autores.

Segundo Monnin, W também pode ser influenciado pelos parâmetros:

- ♦ módulo de elasticidade;
- ♦ posição do limite de proporcionalidade;
- ♦ módulo de ruptura na flexão;
- ♦ deformações no limite de proporcionalidade e no momento da falha.

As considerações de Monnin evidenciam a importância do teste de impacto e contribuem para a formação de conceitos sobre o impacto na madeira, os quais serviram de base para a normalização deste teste.

Para a madeira, a tenacidade apresenta valores elevados, em comparação com outros materiais. Isto a torna particularmente útil para aplicações onde o material está sujeito a cargas de impacto, segundo Schneider et al. (1989).

3.3- Determinação da tenacidade: equipamentos e métodos

3.3.1- Flexão Dinâmica - "Hatt-Turner Test"

A flexão dinâmica foi o primeiro tipo de solicitação não estática cuja resposta foi quantificada para a madeira, Figura (5). O teste em questão caracteriza-se pela aplicação de cargas rápidas e sucessivas, tendo sido muito usado para a madeira no início do século XX, segundo Bodig; Jayne (1992).

Figura 5- Esquema da máquina para o teste de Flexão Dinâmica.
Fonte- Adaptada de Kollmann; Côté (1968).

Na Figura (5), B é o peso do martelo, L é a distância entre os apoios, d é o deslocamento causado pelo martelo atuando como carga estática, y é a deformação adicional causada pelo impacto, D é a altura de queda do martelo sobre a viga durante carga estática, e $(H = D + y)$ altura total da queda do martelo.

Tal teste de flexão dinâmica é feito com a utilização de várias massas (5,625; 11,25; 22,5; 45 e 90 quilogramas), as quais são deixadas cair no centro da amostra em estudo. Utilizam-se as peças com maiores massas, sucessivamente, até que ocorra a ruptura do corpo-de-prova, conforme citação de Siqueira (1986).

As equações que governam este teste têm como base o pressuposto que a energia de impacto é inteiramente recuperável acima do limite de proporcionalidade e a forma fletida da viga durante a solicitação dinâmica é idêntica à do carregamento estático, como mencionam Kollmann; Côté (1968).

O longo tempo requerido para a realização do teste e as hipóteses adotadas na derivação das equações que descrevem o fenômeno foram, em parte, responsáveis pelo declínio de seu uso, de acordo com Bodig; Jayne (1992).

3.3.2- Teste Izod

A máquina de teste Izod comum tem capacidade de 162,72 J. O teste é similar ao Charpy, embora a disposição e as características do corpo-de-prova sejam diferentes. No teste de impacto Izod, ao contrário do que ocorre no teste de impacto de Charpy, o pêndulo choca-se com a face dianteira do corpo-de-prova que tem dimensões $1cm \times 1cm \times 7,5cm$ e um corte de incisão de 45^0 com 2mm de profundidade, conforme mostra a Figura (6).

A resistência ao impacto do corpo-de-prova é determinada a partir do ângulo de elevação do pêndulo após ocorrer a ruptura. É possível obter-se a energia absorvida no impacto através de uma leitura do ângulo final do pêndulo, diretamente do indicador do instrumento de teste, segundo Horath (1995). Os testes de Izod e Charpy diferem na configuração dos corpos-de-prova e na velocidade com a qual o pêndulo os atinge. No teste de Charpy o corpo-de-prova é sustentado como uma viga simples, no Izod como uma viga em balanço. Atualmente, é restrita a aplicação do equipamento de Izod na prática laboratorial.

3.3.3- Pêndulo de Charpy

O pêndulo desenvolvido por G.Charpy teve como base a idéia de S.B.Russel. Segundo autores como Gerhards (1968), Bodig; Jayne (1992), o ensaio com o pêndulo de Charpy é muito eficiente, dada a facilidade da execução e da obtenção dos valores da tenacidade.

Dois tipos de máquinas utilizam o pêndulo de Charpy para a determinação da tenacidade em madeira: uma mais difundida na Europa (Amsler), Figura (7), e outra desenvolvida nos EUA pelo Forest Products Laboratory (FPL), que utiliza o pêndulo de Charpy modificado, Figura (8). O princípio de funcionamento de tais máquinas é a transmissão da energia cinética fornecida pelo pêndulo, através de uma corrente flexível em cuja extremidade é utilizado um apoio. Em ambas as máquinas, a ruptura do corpo-de-prova deve se dar em uma só pancada.

Figura 6- Esquema do aparato para os testes de impacto de Izod e Charpy.
Fonte- Adaptada de Hayden et al. (1965)

Figura 7- Máquina tipo AMSLER.
Fonte- Adaptada de Guy (1980).

Figura 8- Máquina tipo FLP.
Fonte- ASTM D143-52.

Registra-se que o equipamento empregado na parte experimental da presente dissertação foi desenvolvido por Siqueira (1986), com base na máquina tipo FLP. Maiores detalhes sobre este tópico estão apresentados no Capítulo 4.

3.4- Procedimentos para a determinação da tenacidade

As equações que inicialmente regiam a determinação da tenacidade tinham como base o movimento do pêndulo, mostrado na Figura (9). O sistema formado pela haste e a cabeça do pêndulo atua como se fosse um único corpo de peso B , localizado em C , a uma distância l do eixo de rotação O . No início do movimento, o centro de massa está localizado a uma altura inicial h_i em relação ao seu ponto mais baixo A . Se o pêndulo for solto livremente, chegará à sua máxima posição, h_o , no lado esquerdo, onde $h_o < h_i$, em razão do atrito.

Figura 9- Detalhe da máquina tipo AMSLER.
Fonte- Bodig; Jayne (1992).

A ruptura do corpo-de-prova S pelo pêndulo provoca redução, para o valor h_a , da altura máxima alcançada por C . A diferença da energia antes do contato e depois do contato corresponde à energia necessária para produzir a falha.

$$\text{Tenacidade} = W = U_{K_0} - U_{K_a}, \quad (18)$$

onde U_{K_0} e U_{K_a} são as energias cinéticas inicial e final do pêndulo. A energia necessária para causar a falha no corpo-de-prova pode também ser expressa como a variação na energia potencial do pêndulo:

$$W = Bh_0 - Bh_a = B(h_0 - h_a). \quad (19)$$

Finalmente, as alturas h_0 e h_a podem ser expressas em termos dos ângulos β e δ mostrados na Figura (9):

$$\begin{aligned} h_0 &= l - l \cos \beta = l(1 - \cos \beta) \\ h_a &= l - l \cos \delta = l(1 - \cos \delta). \end{aligned} \quad (20)$$

Substituindo na Eq.(19) e invertendo-se os sinais para expressar o trabalho do corpo de prova, tem-se:

$$W = Bl(\cos \beta - \cos \delta). \quad (21)$$

O peso do martelo B , a distância l do centro de rotação ao centro de massa, em C e os ângulos β e δ da oscilação, são necessários para o cálculo da tenacidade W . Normalmente o peso é expresso em Newtons, o comprimento em metros e a tenacidade em Nm .

A máquina para medir a tenacidade desenvolvida pelo U. S. Forest Products Laboratory utiliza o mesmo princípio básico que o pêndulo, segundo Bodig; Jayne (1992). A carga é aplicada na amostra através de uma corrente que se enrola sobre um tambor, tendo o mesmo eixo de rotação do pêndulo, Figura (8). O peso inicial e o comprimento da haste podem ser ajustados para fornecer vários níveis de energia,

Figura (10). Assim sendo, uma ampla faixa de valores de tenacidade da amostra em exame pode ser determinada. Essa máquina foi projetada para determinar-se prioritariamente a tenacidade da madeira.

Figura 10- Detalhe da haste que permite o ajuste da cabeça do pêndulo.
Fonte- Adaptada de Siqueira (1986).

Para o teste da tenacidade têm-se adotado corpos-de-prova com dimensões nominais de $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 28\text{cm}$, de acordo com a ASTM D143-52. A padronização do teste é altamente desejável, pois diferentes tipos de equipamentos podem apresentar diferentes resultados, segundo Drow et al. (1965). Para pequenas variações da seção transversal das amostras, mas com uma distância constante entre os apoios, pode-se considerar uma relação linear entre a dimensão e a tenacidade. Tendo como base esta relação, os resultados podem se ajustados para uma seção transversal A por meio da Eq. (22):

$$W_{\text{padrão}} = \frac{A_{\text{padrão}}}{A_{\text{teste}}} W_{\text{teste}} \quad (22)$$

onde:

A_{teste} = área da seção transversal do corpo-de-prova em teste.

$A_{padrão}$ = área da seção transversal do corpo-de-prova padrão.

W_{teste} = tenacidade do corpo-de-prova em teste.

$W_{padrão}$ = tenacidade do corpo-de-prova corrigida.

3.5- Fatores que afetam a tenacidade

Diversos fatores afetam a tenacidade da madeira, mencionando-se entre eles: inclinação das fibras; densidade; teor de umidade; temperatura; características anatômicas da madeira; variação das dimensões dos corpos-de-prova; anéis de crescimento, nível de lignificação das camadas de crescimento; degradação (através microorganismos, calor e outros mecanismos). A impregnação para a obtenção de um compósito madeira-polímero, assim como outros tipos de compósitos de madeira, também altera a tenacidade da mesma.

3.5.1- Inclinação das fibras

A variação da inclinação das fibras afeta a tenacidade e, conseqüentemente, a resistência ao choque da madeira. Kollmann; Côté (1968) verificaram que, para um ângulo de 5° , ocorre uma redução de 10% no valor da tenacidade e, para um ângulo de 10° , a tenacidade é reduzida em 50% de seu valor, Figura (11).

Figura 11- Variação da tenacidade com o ângulo entre o eixo do corpo-de-prova e a direção da fibra.

Fonte- Ghelmeziu³ (1937/38) adaptada de Kollmann; Côté (1968).

De acordo com os mencionados autores, a expressão de Hankinson permite estimar a energia absorvida W_γ em função do ângulo γ de inclinação das fibras:

$$W_\gamma = \frac{W // W \perp}{W // \sin^n \gamma + W \perp \cos^n \gamma} \quad (23)$$

onde $W //$ é a tenacidade para $\gamma = 0^\circ$, e $W \perp$ é a tenacidade para $\gamma = 90^\circ$. O expoente n varia entre 1,5 e 2.

Os corpos-de-prova com fibras visivelmente inclinadas devem ser rejeitados antes dos testes, mas pequenos desvios de fibras nos corpos-de-prova podem passar despercebidos durante a seleção. Interessante é a experiência de Fagan; McLain (1983), que prepararam cuidadosamente duzentos e vinte e seis corpos-de-prova de

³ GHELMETZIU, N. Untersuchungen über die Schlagfestigkeit von Bauhölzern. *Holz als Roh- und Werkstoff*, v.1, p.585-601, 1937/38.

Redwood (*Sequoia sempervirens*), na tentativa de obter a desejada orientação de fibras. Como resultado apenas dez corpos-de-prova apresentaram fibras orientadas no intervalo de 0 a 15°. O valor da tenacidade é sensível a pequenas inclinações das fibras. Portanto, se ocorrer alta variabilidade (coeficiente de variação acima de 0,6) nos resultados experimentais, a mesma poderá ser atribuída a esse aspecto.

3.5.2- Densidade

Uma investigação feita por Koehler (1933), sobre as causas da fragilidade da madeira dadas pela média dos resultados da máquina de pêndulo tipo FPL, constatou que quanto maior a densidade ρ da madeira, maior o valor da tenacidade da mesma, e que a relação tenacidade versus densidade segue uma função parabólica.

Cockrell; Knudson (1973) estudaram a relação entre densidade a tenacidade da espécie Giant Sequoia (*Sequoia gigantea*) e chegaram a conclusão semelhante.

A densidade da madeira é um bom estimador para suas propriedades de resistência. Em termos gerais, segundo Panshin; Zeeuw (1980), a relação entre a densidade e a resistência pode ser expressa pela Eq.(24),

$$S = K(G)^n \quad (24)$$

onde:

S = qualquer propriedade de resistência.

K = constante de proporcionalidade dependendo da propriedade de resistência.

n = expoente que define a forma da curva que representa a relação.

G = densidade específica.

Kollmann; Côté (1968) apresentaram resultados de testes feitos em mil e quinhentos corpos-de-prova sujeitos à flexão dinâmica na espécie Ashwood (*Fraxinus sp*). A relação entre tenacidade e densidade pode ser, simplificada,mente,

ajustada para uma linha reta, porém a parábola cúbica representa melhor os pontos obtidos ($a = 2,33 \rho^3$).

Ghelmeziu (1937/38) apud Kollmann; Côté (1968), testando as madeiras das espécies Spruce (*Picea sp*), Pinus (*Pinus sp*), Beech (*Nothofagus sp*) e Oak (*Quercus sp*), entre 11% e 12% de umidade, no pêndulo Amsler, obteve os resultados mostrados na Figura (12), fornecidos pela Eq.(25):

Figura 12- Efeito da densidade sobre o trabalho de impacto para Spruce (*Picea sp*), Pinus (*Pinus sp*), Beech (*Nothofagus sp*) e Oak (*Quercus sp*).
Fonte- Ghelmeziu (1937/38) adaptada de Kollmann; Côté (1968).

$$a = c(\rho_u)^n \quad (25)$$

onde:

a = trabalho de impacto.

c = pode variar de 1,5 a 2,1.

n = normalmente é 2, exceto para as espécies Oak (*Quercus sp*) e Ash (*Fraxinus sp*).

ρ_u = densidade da amostra a uma umidade u .

3.5.3- Teor de umidade

Variações no teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras resultam em variações nas propriedades mecânicas. As propriedades apresentam valores mais altos a teores de umidade menores, exceto aquelas relacionadas ao impacto, como a tenacidade, que podem permanecer equivalentes, sofrerem reduções ou acréscimos para teores de umidade menores, segundo Faherty; Williamson (1989).

GERHARDS (1968) verificou que a tenacidade em madeira Hickory (*Carya cordiformis*), sob condição verde, é maior do que seca ao ar.

Kretschmann; Green (1996) realizaram testes em aproximadamente quarenta amostras de Southern Pine (*Pinus echinata*) e observaram que a tenacidade à fratura, do Modo I (ruptura concentrada) ou do Modo II (ruptura "espalhada"), diminui com o decréscimo do teor de umidade da madeira verde, para 12% a 15%, ver Figura (17).

Madeira seca é menos flexível que madeira verde. Este fato está ilustrado na Figura (4). As áreas sob as curvas carga x deformação, que são proporcionais ao trabalho total, até o ponto de completa ruptura são fortemente influenciadas pelo teor de umidade da madeira.

Markwardt & Wilson (1935) concluíram, na avaliação dos resultados de testes de impacto, que o teor de umidade variando entre 12 e 15% não provoca variação significativa na tenacidade das amostras estudadas..

Em diversos ensaios estáticos, a deformação da madeira é diretamente proporcional à variação de sua umidade. Contudo, observa-se que quando a madeira apresentar umidade entre 10% e 20%, a tenacidade quase não varia, como mostrado na Figura (13), Ghelmeziu (1937/38) apud Kollmann; Côté (1968).

Estudos feitos por Ewing; Williams (1979), em amostras de Scots Pine (*Pinus sylvestris*) ensaiadas para a determinação da tenacidade, com umidade variando entre 0 a 20%, mostraram que tal propriedade não varia significativamente para este intervalo de umidade.

Figura 13- Efeito do teor de umidade no trabalho de impacto.
Fonte- Ghelmeziu (1937/38) adaptada de Kollmann; Côté (1968).

3.5.4- Temperatura

Usualmente o aumento de temperatura provoca diminuição da coesão entre as moléculas. O entendimento da relação do trabalho de impacto e a temperatura, no caso da madeira, é menos intuitivo do que a relação do trabalho desprendido sob carga estática com a temperatura, segundo Kollmann; Côté (1968).

As curvas da Figura (14) foram obtidas por Thuneel⁴ (1941) apud Kollmann; Côté (1968) e representam um diagrama que relaciona a temperatura com o trabalho de impacto com diferentes densidades e em condições seca ao ar e verde. Pode-se deduzir, desse gráfico, que o trabalho de impacto do Pinewood (*Pinus sp*), $\rho = 0,52 \text{ g/cm}^3$, quando seco ao ar (12%) aumenta consideravelmente a baixas temperaturas (menores que -20°).

Figura 14- Efeito da temperatura no trabalho de impacto para o *Pinus sp* com diferentes densidades, em condições seco ao ar e próximo a verde.
Fonte- Thunell (1941) adaptada de Kollmann; Côté (1968).

Algumas espécies, em elevados teores de umidade (acima de 70 %, por exemplo) apresentam tendência oposta ao que foi observado. O efeito da temperatura foi maior em madeiras mais densas do que em menos densas. Sulzberger (1948), em seus estudos, verificou que o efeito da temperatura também varia dependendo da densidade da espécie considerada.

⁴ THUNELL, B. Hållfasthetsegenskaper hos svenskt furuvirke utan kvistar och defekter. *Ing. Vet. Akad. Handl.*, n.161, p.40, 1941.

3.5.5- Propriedades anatômicas da madeira

Testes feitos por Keith (1966) com madeiras de diferentes tipos anatômicos representadas por Ash (*Fraxinus sp*), Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*), Basswood (*Tilia americana*) e Balsam Fir (*Abies balsamea*) mostraram diferenças significativas na tenacidade associadas com a orientação dos anéis anuais nos corpos-de-prova em relação à direção do impacto. Este autor verificou que a capacidade da madeira em resistir ao choque varia se o impacto é feito na superfície tangencial ou radial. Isso aparenta ser uma característica mais comum do comportamento de coníferas do que de dicotiledôneas.

Em testes de tenacidade feitos em European beech, Seeger⁵ (1937) apud Keith (1966), não encontrou diferenças de tenacidade entre corpos-de-prova solicitados na superfície radial comparados com os solicitados na superfície tangencial. Discutindo suas observações, entretanto, ele sugere que as dicotiledôneas com estrutura composta por anéis mais ou menos porosos, devem apresentar um comportamento mais parecido com as coníferas no que diz respeito à resistência ao impacto nas direções radial e tangencial.

Koehler (1933) sugeriu que a tenacidade de vigas muito pequenas pode ser afetada pela localização de uma camada relativamente espessa de lenho inicial ou tardio em ambas superfícies de compressão ou tração. Este efeito, entretanto, não pôde ser demonstrado por Keith (1964) em corpos-de-prova similares de Douglas Fir. Quanto menores os corpos-de-prova do teste ou mais largas as camadas anuais, as posições dos lenhos inicial e tardio tornam-se mais críticas.

Estudos feitos por Keith (1964) sobre a variação da tenacidade em madeira Douglas Fir, demonstraram que corpos-de-prova apresentaram menor tenacidade quando o impacto foi feito na direção radial em relação à tangencial. Os estudos também demonstraram que, entre os corpos-de-prova solicitados nas superfícies tangenciais, ocorreram diferenças na tenacidade, dependendo se a carga foi aplicada na superfície tangencial interna (medula) ou externa (casca).

⁵ SEEGER, R. Untersuchungen über den Gütevergleich von Holz nach der Druckfestigkeit in Faserrichtung und nach der Schlagfestigkeit. *Forschungs-berichte Holz*, Heft 4, Fachausschuss für Holzfragen, Berlin, 1937.

Testes realizados por Schniewind; Pozniak (1968) em Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*) demonstraram que corpos-de-prova com falhas no plano radial-longitudinal oferecem valores mais altos de tenacidade quando as falhas se propagam na radial quando comparados com a direção longitudinal.

Gerhards (1968) concluiu que existe uma certa semelhança no valor da tenacidade tanto na face tangencial como na face radial, mas esta afirmação só é válida para dicotiledôneas enquanto que para coníferas a tenacidade na face radial é bem menor do que na face tangencial.

O comprimento das fibras e o diâmetro das cavidades celulares têm pouco ou nenhum efeito na tenacidade, considerando espécies de mesma densidade, segundo Gerry (1915), Forsaith (1921) e Koehler (1933).

Em ensaios de flexão dinâmica feitos por Clarke (1935), com madeira Ash (*Fraxinus sp*), verificou-se que a ruptura ocorre quase que exclusivamente na lamela média. As células das paredes secundárias, as quais são destruídas no teste de compressão, se mantêm intactas durante o teste de tenacidade.

3.5.6- Variação das dimensões dos corpos-de-prova

Geralmente no teste de impacto à flexão dinâmica e de determinação da tenacidade, os corpos-de-prova apresentam seção transversal quadrada, possuindo dimensões variadas. De acordo com Siqueira (1990), a variação das dimensões da amostra pode influir significativamente nos valores da tenacidade. O volume dos corpos-de-prova no teste de Flexão Dinâmica deve ser da ordem de 1750cm^3 . Já no teste feito com o pêndulo de Charpy o volume correspondente deve ser da ordem de 96cm^3 .

Até 1949, nos Estados Unidos, o corpo-de-prova para o teste de tenacidade devia ter as dimensões de $1,5\text{cm} \times 1,5\text{cm} \times 25\text{cm}$, além de ser sustentado por dois apoios que se distanciavam entre si de 12cm . Posteriormente, o Forest Products Laboratory utilizou em suas pesquisas as dimensões de $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 28\text{cm}$. Tais dimensões possibilitaram que os resultados dos Estados Unidos (máquina tipo FLP) e da Europa (máquina tipo Amsler) fossem comparáveis, segundo Kollmann; Côté

(1968). A ASTM (1981) padronizou as dimensões dos corpos-de-prova em $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 28\text{cm}$, com base neste estudo sobre o teste de tenacidade.

Segundo Gerhards (1968), a razão tenacidade pelo volume da amostra de madeira entre os apoios é bem menor nas amostras grandes $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 28\text{cm}$, do que nas amostras menores $1,5\text{cm} \times 1,5\text{cm} \times 25\text{cm}$. Portanto pode-se dizer que a razão tenacidade pelo volume da amostra não é um bom parâmetro para caracterizar a tenacidade da madeira.

Como a variação da seção transversal é significativa nos resultados de tenacidade, Bodig; Jayne (1992) sugerem a correção dessa seção, considerando uma variação linear da tenacidade com a área transversal do corpo-de-prova, válida somente para pequenas variações de seção.

3.5.7- Anéis de crescimento, posição na árvore e lignificação

A largura dos anéis de crescimento, sob solicitação dinâmica, causa uma variação considerável na tenacidade da madeira, de acordo com Kollmann; Côté (1968). Os valores da tenacidade diminuem com o aumento da largura dos anéis. Isto deve-se ao fato que, quanto maior a largura dos anéis de crescimento, menor será a densidade.

Estudos conduzidos por Baker (1970) em White Ash (*Fraxinus americana*), mostraram que valores mais baixos de tenacidade correspondiam a amostras com número maior de anéis de crescimento.

Barefoot (1963) observou que a densidade e a tenacidade diminuem da base da árvore para a copa. Verificou também que o aumento do índice de lignificação corresponde a um aumento de tenacidade.

Barefoot (1965), estudando vinte e quatro amostras de Yellow Poplar (*Liriodendron tulipifera*), verificou que a quantidade de celulose e de lignina está diretamente relacionada com a tenacidade. Os resultados obtidos por esse autor levam a crer que essa propriedade é mais sensível à matriz de celulose do que à de lignina.

3.5.8- Degradação

A resistência ao choque tem se revelado como um dos mais eficazes testes para qualificar os efeitos da degradação, tal como o ataque de fungos, ataques químicos ou prolongadas exposições a temperaturas elevadas. Como a tenacidade é mais sensível à degradação térmica do que a resistência e o módulo de elasticidade na tração, não é surpreendente que apareçam efeitos de degradação em baixos níveis de irradiação térmica no teste de tenacidade, Kollmann et al. (1975).

Nos estudos feitos por Hardie (1980), em amostras atacadas por fungos, verificou-se uma diminuição de 50% na tenacidade com uma perda de peso correspondente de apenas 5%.

Chapman; Scheffer (1940) utilizando amostras atacadas por fungos Azulão (*Lasiodiplodia theobromae*) verificaram uma considerável diminuição da tenacidade na espécie em estudo, enquanto que outros testes como compressão, flexão, dureza e também densidade (perda por peso) apresentaram baixa sensibilidade na avaliação da degradação da madeira, comparados com o teste de tenacidade.

Concluído um período de seis meses após inoculação com o Azulão, Osvaldo et al. (1998) obtiveram perdas na tenacidade correlacionadas com perdas em peso em Birch (*Betula sp*), Scots Pine (*Pinus sylvestris*) e Caribbean Pine (*Pinus caribaea*). Não encontraram diferenças entre amostras de madeira solicitadas tangencialmente e radialmente no instrumento de medida da tenacidade, provavelmente porque o tamanho dos corpos-de-prova $10mm \times 10mm \times 100mm$ era menor que o especificado nas normas. Os resultados indicaram que o Azulão pode ter um efeito negativo sobre as propriedades mecânicas das dicotiledôneas e coníferas estudadas.

É geralmente aceito que os fungos que provocam podridão branca e parda causam um efeito considerável sobre as propriedades de resistência da madeira, enquanto o Azulão provoca mudanças menores que dependem das espécies e da intensidade do ataque, segundo Osvaldo et al. (1998). No que diz respeito à madeira apodrecida, todas as diminuições nas propriedades de resistência indicam danos nas paredes celulares. Para a avaliação das paredes celulares danificadas, são úteis as observações ópticas, e elas têm sido usadas para o estudo dos padrões de deformação causando falhas na madeira, uma vez tendo-se observado que o apodrecimento por

fungos afeta a morfologia da fratura da madeira apodrecida, segundo Panshin; De Zeeuw (1980) e Akande (1990).

Koch et al. (1996) estudaram a influência das variações secundárias, planos de deslizamento e impregnação por fungos, na resistência ao choque em pinheiros Spruce expostos ao vento e a altas altitudes. Observaram que uma baixa resistência ao choque somente ocorreu em regiões dos troncos com planos de deslizamento e concentração de fraturas. Verificaram, também, que a madeira de árvores afetadas pela poluição, sem variações secundárias, não respondeu a uma diminuição significativa na resistência ao choque.

Devido a esta sensibilidade, a determinação da tenacidade tem sido uma maneira rápida e barata para determinar os efeitos da degradação na resistência da madeira e, também, tem servido de base para selecionar as madeiras que melhor irão resistir à carga dinâmica.

3.5.9- Impregnação com polímero

A impregnação da madeira com um polímero altera significativamente a sua tenacidade. Testes foram realizados por Schneider et al (1989), com a espécie Sugar Maple (*Acer saccharum*) impregnada com polímero vinilo, permitiram o cálculo da sua tenacidade em teores de 0% e 12% de umidade, nas direções radial e tangencial e a comparação com madeira não tratada.

Esse tipo de impregnação aumentou a tenacidade, particularmente para teores maiores de umidade. Nos ensaios feitos na posição tangencial, umidade de 0 e 12%, os aumentos foram de 53,5 e 73,7 %, respectivamente, e na posição radial foram de 35,7 e 51,4%, respectivamente. Através do uso de microscopia, foi possível observar fraturas poliméricas com pouca ou nenhuma deformação plástica prolongando-se através dos lúmens, mas parando nas paredes da interface célula-polímero. A fratura ocorreu na forma de lâminas, geralmente radiais. O acréscimo na tenacidade, devido ao tratamento, colocou o Sugar Maple na faixa de tenacidade do Hickory (*Carya cordiformis*).

Langwig et al. (1968) realizaram medidas de tenacidade em um compósito madeira-polímero. Mediram a tenacidade de corpos-de-prova de Basswood (*Tilia*

americana) não tratada e impregnada com metacrilato de polimetilo e observaram um pronunciado aumento na tenacidade da madeira tratada, mostrado na Figura (15).

Figura 15- Comparação entre a deformação de corpos-de-prova de *Tilia Americana* tratada e não tratada, no teste de flexão
 Fonte- Adaptada de Langwig et al. (1968).

3.5.10- Outros casos

Testes mecânicos em compósitos de argamassa de gesso e fibras de madeira provenientes do *Pinus radiata* demonstraram que as amostras possuíam resistência ao impacto superior a 3 kJ/m^2 com 10% de massa de fibras de madeira, sendo então um ótimo produto para a construção, segundo Coutts; Ward (1987). As fibras que não se rompem no impacto tendem a ter um forte revestimento com uma camada do material matriz, sugerindo uma ligação interfacial entre as fibras de madeira e a argamassa de gesso.

Rowell; Banks (1987) estudaram a tenacidade da madeira em espécies de *Pinus sylvestris* e *Tilia vulgaris* para vários níveis de impregnação com anídrido acético. Houve melhora da estabilidade dimensional e da resistência biológica da madeira. Este processo indicou uma insignificante redução da tenacidade do material.

3.6- **Correlação entre tenacidade de dicotiledôneas e densidade específica**

Segundo Gerhards (1968), até então não se dispunha de conversões satisfatórias entre os valores de tenacidade e outras propriedades mecânicas da madeira.

Para verificar se há uma relação entre tenacidade nas dicotiledôneas e densidade básica, Wengert (1979) estudou dezessete espécies de madeira com valores médios de tenacidade já conhecidos. Para cada espécie, obteve valores médios, mostrados na Figura (16).

Usando análise de regressão, chegou à Eq. (26), plotada na Fig.(16).

$$\text{Tenacidade (in.lb)} = 151 + 8072 (SG)^6 \quad (26)$$

A Eq.(26) está apresentada em unidades distintas das adotadas pelo SI, uma vez que se trata de referência a trabalho disponível na literatura.

Embora Wengert (1979) não tenha usado uma teoria mecânica básica de madeira para desenvolver esta equação, ela mostrou-se útil para ajustar ou prever valores de tenacidade para dicotiledôneas dentro da faixa de densidade específica de 0,32 a 0,65, de uma forma similar àquela usada quando outros valores de resistência são ajustados pela densidade específica.

Figura 16- Tenacidade de dicotiledôneas com aproximadamente 12% de umidade versus densidade básica. A linha sólida representa a Eq.(26).
Fonte- Adaptada de Wengert (1979).

3.7- Fenômeno de ruptura e seus tipos

Nos testes de flexão dinâmica ou de determinação da tenacidade, os tipos de ruptura podem caracterizar a qualidade da madeira, Kollmann; Côté (1968). A madeira com alta resistência ao choque apresenta, na região de ruptura, lascas longas e delgadas. As camadas de fibras comprimidas, na face sob compressão, mantêm-se intactas, Figura (17a).

Nas espécies com valor intermediário de tenacidade, as lascas, na região de ruptura, são usualmente mais compridas nas faces tracionadas do que nas faces comprimidas, Figura (17b). Algumas espécies apresentam superfícies de ruptura planas, às vezes se assemelhando a degraus, Figura (17c).

Os vários tipos de ruptura são excelentes para a identificação da fragilidade ou tenacidade da amostra de madeira que foi submetida ao teste. Madeiras frágeis rompem-se rapidamente com pequena deformação e, em madeiras tenazes, a ruptura é acompanhada por uma grande deformação.

Figura 17- Tipos de ruptura em amostras de madeira depois do ensaio de impacto (tenacidade): a) Madeira com alta resistência ao impacto (ruptura espalhada), b) Madeira com resistência intermediária ao impacto (ruptura concentrada), c) Madeira frágil.

Fonte- Kollmann⁶ (1951) adaptada de Kollmann; Côté (1968).

⁶ KOLLMANN, F. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. v.1, 2.ed. Springer Verlag, (1951).

3.8- Documentos normativos

Comparando os documentos normativos NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT); D143-52 - Standard methods of testing small clear specimens of timber, da American Society for Testing and Materials (ASTM); ISO 3348(E) - Wood: determination of impact bending strength, da International Standard Organization e a DIN 52 189-Schlagbiegeversuch Bestimmung der Bruchschlagarbeit, da Deutsches Institut für Normung, observa-se que existem semelhanças e algumas diferenças entre elas:

- ◆ As normas DIN, ISO e ABNT descrevem os procedimentos para a determinação da resistência de um corpo-de-prova de madeira ao impacto na flexão; somente a ASTM define os procedimentos para a obtenção do valor da tenacidade da madeira.
- ◆ A dimensão dos corpos-de-prova é de $20mm \times 20mm \times 300mm$ para a DIN, ISO e ABNT e de $20mm \times 20mm \times 280mm$ para a ASTM.
- ◆ Para a ABNT os corpos-de-prova devem ser fabricados com os lados perpendiculares às direções preferenciais da madeira, não admitindo-se inclinações das fibras maiores que 6^0 em relação ao comprimento do corpo-de-prova.
- ◆ A medida das dimensões deve ser feita com precisão de $0,1mm$, para todas as normas.
- ◆ Os ensaios devem ser realizados nas direções radial e tangencial da madeira na ASTM, ISO e ABNT e somente na direção radial na DIN.
- ◆ A máquina de impacto de pêndulo deve ter uma capacidade de energia de 3 a 5 vezes maior que a necessária à ruptura do corpo-de-prova por flexão, com precisão de $1J$ para a ISO e ABNT, e uma capacidade de $150J$ para a DIN.

- ♦ o corpo-de-prova deve ser apoiado sobre dois apoios cilíndricos de $15\text{mm} \pm 1\text{mm}$ de raio para a DIN, ISO e ABNT, e com $240\text{mm} \pm 1\text{mm}$ de distância entre seus eixos para todas as normas.
- ♦ Para a DIN o formato da fratura do corpo-de-prova deve ser registrado no relatório e, quando necessário, o valor da resistência ao impacto na flexão deve ser ajustado para um teor de 12%, quando o ensaio ocorrer com umidade de $12 \pm 3\%$.

3.9- Considerações finais sobre a revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica aborda vários aspectos sobre a tenacidade da madeira, evidenciando não somente a importância do tema, mas também a ausência de trabalhos científicos que gerem subsídios para o melhor conhecimento do assunto, em particular para espécies tropicais nativas do Brasil.

Para preencher tais lacunas, o presente estudo foi realizado com os objetivos específicos registrados no Capítulo 2.

4- MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentados os itens descrevendo os materiais empregados na parte experimental do trabalho; os métodos adotados para a realização dos ensaios; os procedimentos assumidos para a obtenção dos corpos-de-prova. Também são mencionados os equipamentos empregados na experimentação e os procedimentos estatísticos seguidos na análise dos resultados obtidos nos ensaios.

Considerando-se as particularidades do trabalho, os pontos acima citados estão referenciados a cada um dos objetivos específicos, conforme consta no Capítulo 2. Com isto, espera-se proporcionar maior clareza ao texto, facilitando a compreensão dos tópicos abordados ao longo do trabalho.

4.1- Avaliação da variação da tenacidade ao longo do comprimento de barras de madeira

Para alcançar este objetivo foi empregada madeira das espécies mencionadas na Tabela (1).

Tabela 1- Espécies empregadas- Objetivo 1.

Nome Vulgar	Nome Científico	Procedência
Angelim Saia	<i>Vatairea sp</i>	Nordeste de Mato Grosso
Eucalipto Grandis	<i>Eucalyptus grandis</i>	Itirapina (São Paulo)
Pinus Elliottii	<i>Pinus elliottii</i>	Itirapina (São Paulo)

Os ensaios foram realizados de acordo com as recomendações do Anexo B da NBR 7190/1997 - Projeto de estruturas de madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O cálculo da tenacidade foi feito considerando-se o que prescreve o documento normativo D143-52/1981, da American Society for Testing and Materials (ASTM).

Para os ensaios de compressão e flexão foi utilizada a máquina Universal AMSLER, com capacidade de 250.000 N, apresentada na Figura (18).

Figura 18- Máquina Universal AMSLER.

Os ensaios para a determinação da tenacidade foram realizados no equipamento desenvolvido por Siqueira (1986), mostrado na Figura (19), com base na máquina tipo FPL descrita no Capítulo 3. Tal equipamento está disponível no

Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC).

Pelo fato de ser necessário se alcançar a ruptura dos corpos-de-prova a ensaiar, deve-se proceder aos ajustes prévios da máquina, conforme a descrição apresentada no Anexo.

Figura 19- Máquina desenvolvida por Siqueira (1986) para a determinação da tenacidade

Na retirada das amostras cuidados especiais foram tomados para que os anéis de crescimento estivessem posicionados paralelamente a duas arestas dos corpos-de-prova, como mostra a Figura (20)

Figura 20- Posição dos anéis de crescimento em relação às arestas dos corpos-de-prova.

Deste modo, foi possível realizar ensaios para a determinação da tenacidade com o impacto ocorrendo:

- ◆ perpendicularmente à aresta representada por AB, na Figura (20), solicitando à tração as fibras mais próximas à medula;
- ◆ perpendicularmente à aresta representada por CD, na Figura (20), solicitando à tração as fibras mais próximas à casca;
- ◆ perpendicularmente à aresta representada por BD, na Figura (20), solicitando à tração a face radial do corpo-de-prova.

Para se alcançar o primeiro objetivo do trabalho foram preparadas duas barras, isentas de defeitos, com dimensões nominais $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 100\text{cm}$, para cada uma das três espécies consideradas. Cada uma das barras forneceu três corpos-de-prova, de dimensões nominais $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 30\text{cm}$, para os ensaios com posição de impacto indicadas nas Figuras (21), (22) e (23).

Figura 21- Retirada dos corpos-de-prova para ensaio com o impacto provocando tração nas fibras mais próximas à medula (Posição I).

Figura 22- Retirada dos corpos-de-prova para ensaio com o impacto provocando tração nas fibras mais próximas à casca (Posição II).

Figura 23- Retirada dos corpos-de-prova para ensaio com o impacto provocando tração na face radial do corpo-de-prova (Posição III).

Na análise dos resultados deste item foram empregados os procedimentos estatísticos: comparação de duas médias e comparação de pares, usuais em casos desta natureza. Informações mais detalhadas sobre tais análises podem ser encontradas em publicações da área, como Fusco (1977), Meyer (1972), entre outros.

4.2- Avaliação da influência da orientação dos anéis de crescimento na tenacidade da madeira

Para alcançar este objetivo foi empregada madeira das espécies mencionadas na Tabela (2).

Tabela 2- Espécies empregadas- Objetivo 2.

Nome Vulgar	Nome Científico	Procedência
Angelim Saia	<i>Vatairea sp</i>	Nordeste de Mato Grosso
Eucalipto Citriodora	<i>Eucalyptus citriodora</i>	Itirapina (São Paulo)
Eucalipto Grandis	<i>Eucalyptus grandis</i>	Itirapina (São Paulo)
Pinus Elliottii	<i>Pinus elliottii</i>	Itirapina (São Paulo)

Na realização dos ensaios foram utilizados os métodos mencionados em 4.1.

Para se alcançar o segundo objetivo do trabalho foram preparadas cento e duas barras, isentas de defeitos, com dimensões nominais $2cm \times 2cm \times 100cm$, sendo treze de Angelim Saia (AS), vinte de Eucalipto Citriodora (EC), trinta e quatro de Eucalipto Grandis (EG) e trinta e cinco de Pinus Elliottii (EL). De cada uma das cento e duas barras foram retirados três corpos-de-prova, conforme mostra a Figura (24). Também neste caso cuidados especiais foram tomados para que os anéis de crescimento estivessem posicionados paralelamente a duas arestas dos corpos-de-prova, conforme pode ser visto na Figura (20).

Desta forma, cada barra fornece três corpos-de-prova, sendo um para cada posição de ensaio (I, II e III), conforme descrição apresentada no item 4.1.

Na análise dos resultados foram empregados os procedimentos estatísticos: comparação de duas médias e comparação de pares, usuais em casos desta natureza. Informações mais detalhadas sobre tais análises podem ser encontradas em publicações da área, como Fusco (1977), Meyer (1972), entre outros.

Figura 24- Esquema de retirada dos corpos-de-prova para o estudo da influência da orientação dos anéis de crescimento na tenacidade da madeira.

4.3- Avaliação da influência da umidade na tenacidade da madeira

Para alcançar este objetivo foi empregada madeira das espécies mencionadas na Tabela (3).

Tabela 3- Espécies empregadas- Objetivo 3.

Nome Vulgar	Nome Científico	Procedência
Angelim Saia	<i>Vatairea sp</i>	Nordeste de Mato Grosso
Eucalipto Citriodora	<i>Eucalyptus citriodora</i>	Itirapina (São Paulo)
Eucalipto Grandis	<i>Eucalyptus grandis</i>	Itirapina (São Paulo)
Pinus Elliottii	<i>Pinus elliottii</i>	Itirapina (São Paulo)

Na realização dos ensaios foram utilizados os métodos mencionados em 4.1.

Para se alcançar o terceiro objetivo do trabalho foram preparadas seis barras, isentas de defeitos, com dimensões nominais $2cm \times 2cm \times 200cm$, de cada uma das quatro espécies consideradas. Cada barra forneceu seis corpos-de-prova, sendo que

um dos corpos-de-prova foi utilizado como referência para a estimativa da umidade da barra, conforme ilustra a Figura (25). A partir deste valor, fazendo-se o controle de peso das amostras colocadas em climatizadora do SET/LaMEM, os corpos-de-prova foram condicionados nas porcentagens de umidade de 30, 20 e 12%. Valores de umidade ao redor de 6 e de 0% foram obtidos colocando-se as amostras em estufa, aumentando-se gradativamente a temperatura. Com isto buscou-se reduzir a incidência de defeitos nos corpos-de-prova. Registra-se que, em alguns casos, foram necessários até vinte e cinco dias para atingir 0% de umidade. Alcançadas as condições desejadas, os corpos-de-prova eram ensaiados para a determinação da tenacidade. Também neste caso cuidados especiais foram tomados para que os anéis de crescimento estivessem posicionados paralelamente a duas arestas dos corpos-de-prova, conforme está mostrado na Figura (20).

Figura 25- Esquema da retirada dos corpos-de-prova para o estudo da influência da umidade na tenacidade da madeira.

Os ensaios foram realizados de modo a que as fibras mais próximas à medula fossem solicitadas à tração.

Na avaliação dos resultados foram empregados conceitos de análise de regressão.

4.4- Determinação da variabilidade dos valores da tenacidade da madeira

Para alcançar este objetivo foi empregada madeira das espécies tropicais crescidas no Brasil, mostradas na Tabela (4).

Tabela 4- Espécies empregadas - Objetivos 4 a 7.

Nome Vulgar	Nome Científico	Procedência
Angelim Amargoso	<i>Vatairea fusca</i>	Sul de Roraima
Angelim Araroba	<i>Vataireopsis araroba</i>	Sul de Roraima
Angelim Ferro	<i>Hymenolobium sp</i>	Sul de Roraima
Angelim Pedra	<i>Hymenolobium paetrum</i>	Sul de Roraima
Angelim Pedra Verdadeiro	<i>Dinizia excelsa</i>	Sul de Roraima
Angico Preto	<i>Piptadenia macrocarpa</i>	Sul de Rondônia
Branquílio	<i>Terminalia sp</i>	Mato Grosso do Sul
Cafearana	<i>Andira sp</i>	Sul de Roraima
Cambará Rosa	<i>Erismia sp</i>	Norte de Mato Grosso
Casca Grossa	<i>Ocotea odorifera</i>	Sul de Roraima
Castelo	<i>Gossypiospermum praecox</i>	Nordeste de Mato Grosso
Catanudo	<i>Calophyllum sp</i>	Nordeste de Mato Grosso
Cedro Amargo	<i>Cedrela odorata</i>	Sul de Roraima
Cedro Doce	<i>Cedrela sp</i>	Sul de Roraima
Cedrorana	<i>Cedrelinga catenaeformis</i>	Sul de Roraima
Copaíba	<i>Copaifera sp</i>	Sul de Roraima
Cupiúba	<i>Goupia glabra</i>	Sul de Roraima
Cutiúba	<i>Qualea paraensis</i>	Sul de Roraima
Garapa	<i>Apuleia leiocarpa</i>	Norte de Mato Grosso
Guaiçara	<i>Luetzelburgia sp</i>	Norte de Mato Grosso
Guaruaia	<i>Peltophorum vogelianum</i>	Norte de Mato Grosso
Ipê	<i>Tabebuia serratifolia</i>	Sul de Roraima
Itaúba	<i>Mezilaurus itauba</i>	Norte de Mato Grosso

Continuação da Tabela (4).

Nome Vulgar	Nome Científico	Procedência
Jatobá	<i>Hymenaea sp</i>	Sul de Roraima
Louro Preto	<i>Ocotea sp</i>	Sul de Roraima
Maçaranduba	<i>Manilkara sp</i>	Sul de Roraima
Mandioqueira	<i>Qualea sp</i>	Sul de Roraima
Oitica Amarela	<i>Clarisia racemosa</i>	Norte de Mato Grosso
Oiuchu	<i>Rapanea sp</i>	Nordeste de Mato Grosso
Pau-óleo	<i>Copaífera sp</i>	Sul de Roraima/Norte de Mato Grosso
Piolho	<i>Tapirira guianensis</i>	Sul do Pará
Quarubarana	<i>Erisma uncinatum</i>	Sul de Roraima
Rabo de Arraia	<i>Vochysia sp</i>	Sul de Roraima
Sucupira	<i>Diploptropis sp</i>	Sul de Roraima
Tatajuba	<i>Bagassa guianensis</i>	Sul de Roraima
Umirana	<i>Qualea retusa</i>	Sul de Roraima

Na realização dos ensaios foram utilizados os métodos mencionados em 4.1.

Para se alcançar os objetivos mencionados nos itens 2.4 a 2.7 deste trabalho foram preparadas doze barras de dimensões nominais $6cm \times 12cm \times 300cm$, isentas de defeitos visíveis, para trinta e seis espécies consideradas. De tais barras, obedecendo as recomendações do Anexo B da NBR 7190/1997, foi obtido um corpo-de-prova para a determinação de cada propriedade física, de resistência e de elasticidade, indicada no referido documento normativo. À vista da abordagem do trabalho, registra-se que as dimensões nominais do corpo-de-prova para a determinação da tenacidade são de $2cm \times 2cm \times 30cm$; do corpo-de-prova para a determinação da resistência e do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras são de $5cm \times 5cm \times 15cm$; e da resistência convencional obtida no ensaio de flexão estática $5cm \times 5cm \times 115cm$.

Neste item, para a avaliação dos resultados, foram utilizados os conceitos de média, desvio padrão e coeficiente de variação.

4.5- Determinação da relação entre a densidade e a tenacidade da madeira

Para alcançar este objetivo foi empregada madeira das espécies tropicais crescidas no Brasil, mostradas na Tabela (4).

Na realização dos ensaios foram utilizados os métodos mencionados em 4.1.

Os corpos-de-prova foram obtidos e ensaiados conforme está descrito em 4.4.

Para a avaliação dos resultados foi utilizada análise de regressão.

4.6- Determinação da relação entre a tenacidade e a resistência da madeira à compressão paralela às fibras

Para alcançar este objetivo foi empregada madeira de espécies tropicais crescidas no Brasil referidas na Tabela (4).

Na realização dos ensaios foram utilizados os métodos mencionados em 4.1.

Os corpos-de-prova foram obtidos e ensaiados conforme está descrito em 4.4.

Para a avaliação dos resultados foi utilizada análise de regressão.

4.7- Determinação da relação entre a tenacidade e a resistência convencional da madeira no ensaio de flexão estática

Para alcançar este objetivo foi empregada madeira de espécies tropicais crescidas no Brasil referidas na Tabela (4).

Na realização dos ensaios foram utilizados os métodos mencionados em 4.1.

Os corpos-de-prova foram obtidos e ensaiados conforme está descrito em 4.4.

Para a avaliação dos resultados foi utilizada análise de regressão.

5- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos na experimentação realizada, com a respectiva discussão, não apenas à luz das referências bibliográficas e dos documentos normativos pertinentes, mas também considerando o interesse dos resultados no que se refere à sua aplicação em situações práticas.

Mais uma vez, na busca da facilidade para a compreensão do texto, os resultados e as discussões estão apresentados em itens correspondentes aos objetivos específicos do trabalho.

5.1- Avaliação da variação da tenacidade ao longo do comprimento de barras de madeira

5.1.1- Justificativa

A presente avaliação foi conduzida com o intuito de se demonstrar a variação insignificante da tenacidade da madeira ao longo do comprimento de barras. Trata-se de um subsídio fundamental para se justificar os procedimentos para obtenção e ensaio dos corpos-de-prova, conforme será apresentado nos itens subseqüentes.

Na hipótese de se evidenciar a variação insignificante da tenacidade ao longo do comprimento de barras, as variações estatisticamente significantes terão sido provocadas por outras variáveis, cuja influência estará sendo quantificada.

5.1.2- Apresentação dos resultados

Nas Tabelas (5), (6) e (7), a seguir, estão apresentados os resultados para a tenacidade, referenciados à unidade de 12%. Pequenas variações no valor da tenacidade provocadas por diferença nos valores das dimensões da seção transversal dos corpos-de-prova foram corrigidas usando as sugestões de Drow et al. (1965). Assim, os valores de tenacidade apresentados nas três tabelas a seguir já estão corrigidos e se referem às três posições (1, 2, 3) ao longo do comprimento da barra, e nas três alternativas de ensaio indicadas.

Na Figura (26) é mostrado um corpo-de-prova rompido no ensaio para a determinação da tenacidade.

Figura 26- Ruptura do corpo-de-prova de tenacidade.

Tabela 5- Tenacidade ao longo do comprimento da barra, com o impacto provocando tração nas fibras mais próximas à medula (Posição I).

C. P.	Tenacidade (1) (Nm)	Tenacidade (2) (Nm)	Tenacidade (3) (Nm)
AS 1	33,42	33,99	33,38
AS 2	30,98	30,72	30,34
EG 1	40,56	39,6	39,74
EG 2	36,56	36,75	36,31
EL 1	22,08	23,46	22,86
EL 2	18,06	17,83	17,47

Tabela 6- Tenacidade ao longo do comprimento da barra, com o impacto provocando tração nas fibras mais próximas à casca (Posição II).

C. P.	Tenacidade (1) (Nm)	Tenacidade (2) (Nm)	Tenacidade (3) (Nm)
AS 1	35,94	33,3	34,24
AS 2	35,14	36,05	37,53
EG 1	34,27	35,73	34,98
EG 2	37,54	35,69	37,56
EL 1	21,25	22,63	23,54
EL 2	24,61	24,32	23,27

Tabela 7- Tenacidade ao longo do comprimento da barra, com o impacto provocando tração na face radial do corpo-de-prova (Posição III).

C. P.	Tenacidade (1) (Nm)	Tenacidade (2) (Nm)	Tenacidade (3) (Nm)
AS 1	40,74	41,35	40,35
AS 2	31,64	32,58	32,96
EG 1	37,93	36,57	36,17
EG 2	38,37	38,56	39,61
EL 1	21,84	20,56	20,00
EL 2	20,66	21,81	20,55

Como o objetivo é avaliar eventual variação da tenacidade ao longo do comprimento da barra para as três espécies estudadas, optou-se por conduzir a análise dos resultados a partir de um parâmetro aqui chamado de "tenacidade relativa" (TR). O valor de TR foi obtido dividindo-se os valores da tenacidade nas posições 1, 2 e 3 (ao longo do comprimento da barra) pelo valor da tenacidade na posição 1. Isto foi feito para os resultados obtidos para as três posições de ensaio dos corpos-de-prova (I, II, III) e os resultados estão apresentados nas Tabelas (8), (9) e (10).

Tabela 8- Tenacidades Relativas (Posição I).

C. P.	Tenacidade Relativa (1)	Tenacidade Relativa (2)	Tenacidade Relativa (3)
AS 1	1,00000	1,01706	0,99880
AS 2	1,00000	0,99161	0,97934
EG 1	1,00000	0,97633	0,97978
EG 2	1,00000	1,00520	0,99316
EL 1	1,00000	1,06250	1,03533
EL 2	1,00000	0,98726	0,96733
Média	1,00000	1,00666	0,99229
D.Padrão	0,00000	0,03082	0,02384

Tabela 9- Tenacidades Relativas (Posição II).

C. P.	Tenacidade Relativa (1)	Tenacidade Relativa (2)	Tenacidade Relativa (3)
AS 1	1,00000	0,92654	0,95270
AS 2	1,00000	1,02590	1,06801
EG 1	1,00000	1,04260	1,02072
EG 2	1,00000	0,95072	1,00053
EL 1	1,00000	1,06494	1,10776
EL 2	1,00000	0,98822	0,94555
Média	1,00000	0,99982	1,01588
D.Padrão	0,00000	0,05416	0,06381

Tabela 10- Tenacidades Relativas (Posição III).

C. P.	Tenacidade Relativa (1)	Tenacidade Relativa (2)	Tenacidade Relativa (3)
AS 1	1,00000	1,01497	0,99043
AS 2	1,00000	1,02971	1,04172
EG 1	1,00000	0,96414	0,95360
EG 2	1,00000	1,00495	1,03232
EL 1	1,00000	0,94139	0,91575
EL 2	1,00000	1,05566	0,99468
Média	1,00000	1,00181	0,98808
D.Padrão	0,00000	0,04226	0,04755

5.1.3- Análise dos resultados

A análise dos resultados foi conduzida em duas etapas. Na primeira, as médias eram analisadas para verificar se as amostras estudadas podiam ser consideradas como retiradas do mesmo universo. Foi o caso das médias das tenacidades relativas 1, 2 e 3, para as posições de ensaio I, II e III. Na segunda, fez-se a comparação de pares a partir dos valores individuais das tenacidades relativas 1, 2 e 3, também para as três posições de ensaio.

Somente se procedeu à segunda fase da análise porque em todos os casos, como será observado, as amostras puderam ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

5.1.3.1- Comparação de médias

O teste consiste em comparar, duas a duas, as médias das amostras das tenacidades relativas 1, 2 e 3, para cada posição de ensaio I, II e III.

Genericamente, tem-se duas amostras compostas por valores $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ e $(y_1, y_2, \dots, y_n)$, com médias x_m e y_m , e desvios padrões s_x^2 e s_y^2 , respectivamente. Nas amostras aqui estudadas, tem-se n_x e n_y elementos, com $n_x = n_y$.

No teste em questão é determinado o valor do parâmetro " t ", calculado pela Eq.(27) deduzida por Fusco (1977).

$$t_{x,y} = \frac{|x_m - y_m|}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_x} (x_i - x_m)^2 + \sum_{i=1}^{n_y} (y_i - y_m)^2}{n_x + n_y - 2} \cdot \frac{n_x + n_y}{n_x \cdot n_y}}} \quad (27)$$

Para que as amostras possam ser consideradas como retiradas do mesmo universo:

$$t_{x,y} \leq t_{(n_x+n_y-2)}(P\%) \quad (28)$$

Sendo $t_{(n_x+n_y-2)}P(\%)$ o valor correspondente à distribuição "t" de Student para $(n_x + n_y - 2)$ graus de liberdade, e nível de probabilidade $P\%$. Em casos como o aqui estudado, adota-se $P = 95\%$.

♦ Posição de ensaio I

Nesta situação têm-se os resultados apresentados na Tabela (11), para as posições 1, 2 e 3, ao longo do comprimento da barra.

Tabela 11- Comparação de médias (Posição I).

Posições	$t_{x,y}$	$t (95\%)$
1 e 2	1,296	2,228
1 e 3	1,940	2,228
2 e 3	2,212	2,228

♦ Posição de ensaio II

Nesta situação têm-se os resultados apresentados na Tabela (12), para as posições 1, 2 e 3, ao longo do comprimento da barra.

Tabela 12- Comparação de médias (Posição II).

Posições	$t_{x,y}$	$t (95\%)$
1 e 2	0,012	2,228
1 e 3	1,493	2,228
2 e 3	1,151	2,228

♦ Posição de ensaio III

Nesta situação têm-se os resultados apresentados na Tabela (13), para as posições 1, 2 e 3, ao longo do comprimento da barra.

Tabela 13- Comparação de médias (Posição III).

Posições	$t_{x,y}$	$t (95\%)$
1 e 2	0,256	2,228
1 e 3	1,504	2,228
2 e 3	1,294	2,228

Para todos os casos analisados, tem-se $t_{x,y} < t (95\%)$. Desta forma, considera-se que todas as amostras, para as posições de ensaio I, II e III, foram retiradas do mesmo universo.

5.1.3.2- Comparação de pares

O teste consiste em avaliar, considerando-se as três posições de ensaio, se a diferença entre as médias da tenacidade relativa (posições 1 e 2; 1 e 3; 2 e 3) pode ser nula, evidenciando que as mesmas podem ser admitidas como estatisticamente equivalentes, a um nível de probabilidade de 95%.

Genericamente, trata-se de determinar o intervalo de confiança da média das diferenças entre dois conjuntos de dados:

$$d_m - \frac{t_{05} \cdot s_d}{\sqrt{n}} \leq \mu_d \leq d_m + \frac{t_{05} \cdot s_d}{\sqrt{n}}, \quad (29)$$

onde:

s_d = desvio padrão das diferenças mencionadas,

n = número de dados em cada conjunto,

t_{05} = valor correspondente à distribuição "t" de Student, para nível de probabilidade 95% e $n - 1$ graus de liberdade,

μ_d = diferença média.

♦ Posição de ensaio I

Nesta situação têm-se os resultados apresentados na Tabela (14), para as posições 1, 2 e 3, ao longo do comprimento da barra.

Tabela 14- Comparação de pares (Posição I).

Posições	Intervalo de confiança
1 e 2	$-0,082 \leq \mu_d \leq 0,069$
1 e 3	$-0,051 \leq \mu_d \leq 0,066$
2 e 3	$-0,011 \leq \mu_d \leq 0,040$

♦ Posição de ensaio II

Nesta situação têm-se os resultados apresentados na Tabela (15), para as posições 1, 2 e 3, ao longo do comprimento da barra.

Tabela 15- Comparação de pares (Posição II).

Posições	Intervalo de confiança
1 e 2	$-0,132 \leq \mu_d \leq 0,133$
1 e 3	$-0,172 \leq \mu_d \leq 0,140$
2 e 3	$-0,111 \leq \mu_d \leq 0,079$

♦ Posição de ensaio III

Nesta situação têm-se os resultados apresentados na Tabela (16), para as posições 1, 2 e 3, ao longo do comprimento da barra.

Tabela 16- Comparação de pares (Posição III).

Posições	Intervalo de confiança
1 e 2	$-0,105 \leq \mu_d \leq 0,102$
1 e 3	$-0,104 \leq \mu_d \leq 0,128$
2 e 3	$-0,063 \leq \mu_d \leq 0,090$

Para todos os casos analisados o intervalo de confiança da média das diferenças contém o zero, permitindo admitir equivalência estatística entre os valores da tenacidade ao longo do comprimento da barra, para as três posições de ensaio estudadas.

5.1.4- Outras considerações

Os resultados obtidos evidenciam a variação estatisticamente insignificante da tenacidade ao longo do comprimento da barra. Esta conclusão é coerente com a obtida por Logsdon (1998), relativa à não variação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, ao longo do comprimento da barra; por Pinheiro; Rocco Lahr (2000), relativa à não variação da resistência à compressão paralela às fibras, ao longo do comprimento da barra.

5.2- Avaliação da influência da orientação dos anéis de crescimento na tenacidade da madeira

5.2.1- Justificativa

Esta avaliação foi realizada visando determinar eventuais variações no valor da tenacidade da madeira provocadas pela posição dos anéis de crescimento relativamente às faces das amostras ensaiadas.

Não sendo possível determinar influência estatisticamente significativa no caso em questão, as variações não desprezíveis terão origem em outras razões, conforme será observado nos itens subseqüentes.

5.2.2- Apresentação dos resultados

Nas Tabelas (17), (18), (19) e (20), a seguir, constam os resultados da tenacidade, referentes à umidade de 12%. Pequenas variações no valor da tenacidade, provocadas por diferenças nos valores das dimensões nominais dos corpos-de-prova, foram corrigidas utilizando-se as sugestões de Drow et al. (1965).

Assim sendo, os valores apresentados já estão corrigidos e se referem às posições I, II e III de ensaio.

Tabela 17- Espécie Angelim Saia- Tenacidade nas posições I, II e III.

C. P.	Tenacidade I (Nm)	Tenacidade II (Nm)	Tenacidade III (Nm)
1 (AS)	41,55	33,06	33,08
2 (AS)	37,00	36,99	33,79
3 (AS)	30,18	32,99	32,20
4 (AS)	33,90	33,76	36,60
5 (AS)	35,97	32,14	34,65
6 (AS)	39,76	36,63	38,21
7 (AS)	41,84	40,25	43,43
8 (AS)	37,29	36,73	41,12
9 (AS)	40,54	32,54	35,55
10 (AS)	35,04	30,67	36,55
11 (AS)	33,38	39,64	39,54
12 (AS)	33,16	34,57	29,91
13 (AS)	33,75	32,54	37,67
Média	36,41	34,81	36,33
D.Padrão	3,64	2,98	3,74

Tabela 18- Espécie Eucalipto Citriodora- Tenacidade nas posições I, II e III.

C. P.	Tenacidade I (Nm)	Tenacidade II (Nm)	Tenacidade III (Nm)
1 (CI)	48,35	49,17	45,96
2 (CI)	57,48	64,58	52,03
3 (CI)	68,54	58,57	62,30
4 (CI)	46,64	46,56	42,65
5 (CI)	53,99	47,02	54,90
6 (CI)	67,54	54,98	69,10
7 (CI)	52,82	60,48	64,74
8 (CI)	61,71	59,00	71,11

Continuação da Tabela 18.

C. P.	Tenacidade I (Nm)	Tenacidade II (Nm)	Tenacidade III (Nm)
9 (CI)	57,14	55,32	60,92
10 (CI)	73,33	52,64	52,31
11 (CI)	50,62	75,75	48,27
12 (CI)	46,43	40,60	54,46
13 (CI)	43,66	47,15	46,57
14 (CI)	51,07	45,69	46,87
15 (CI)	53,79	49,38	59,99
16 (CI)	51,63	43,37	50,29
17 (CI)	55,14	68,06	53,72
18 (CI)	67,20	59,29	73,60
19 (CI)	72,84	64,39	64,89
20 (CI)	78,47	69,24	53,43
Média	57,92	55,56	56,41
D.Padrão	10,13	9,60	8,97

Tabela 19- Espécie Eucalipto Grandis- Tenacidade nas posições I, II e III.

C. P.	Tenacidade I (Nm)	Tenacidade II (Nm)	Tenacidade III (Nm)
1 (EG)	39,64	39,68	40,82
2 (EG)	38,16	39,04	37,79
3 (EG)	39,41	38,58	39,86
4 (EG)	33,50	34,58	33,40
5 (EG)	39,81	40,43	42,15
6 (EG)	34,75	34,44	33,44
7 (EG)	34,12	34,26	34,77
8 (EG)	39,11	39,32	40,53
9 (EG)	36,62	35,51	35,78
10 (EG)	37,41	37,48	39,72
11 (EG)	34,89	33,82	33,40
12 (EG)	35,54	34,08	35,99
13 (EG)	36,60	37,02	37,71
14 (EG)	32,23	31,85	32,22
15 (EG)	49,13	50,74	49,46
16 (EG)	42,76	44,72	43,39
17 (EG)	32,38	33,30	34,05
18 (EG)	43,93	44,64	45,59
19 (EG)	41,71	41,22	40,02
20 (EG)	55,11	51,84	53,30
21 (EG)	38,20	39,94	39,91
22 (EG)	39,86	39,50	41,18

Continuação da Tabela 19.

C. P.	Tenacidade I (Nm)	Tenacidade II (Nm)	Tenacidade III (Nm)
23 (EG)	42,38	38,76	40,62
24 (EG)	50,94	52,70	51,93
25 (EG)	51,83	52,29	51,99
26 (EG)	29,76	27,48	28,54
27 (EG)	53,71	53,99	52,17
28 (EG)	40,83	41,74	47,56
29 (EG)	52,61	50,37	53,69
30 (EG)	49,91	49,85	48,83
31 (EG)	49,41	48,91	50,56
32 (EG)	51,83	52,81	52,67
Média	41,50	41,40	41,97
D.Padrão	7,22	7,34	7,30

Tabela 20- Espécie Pinus Elliottii- Tenacidade nas posições I, II e III.

C. P.	Tenacidade I (Nm)	Tenacidade II (Nm)	Tenacidade III (Nm)
1 (EL)	22,07	21,93	23,80
2 (EL)	26,07	26,51	25,97
3 (EL)	18,86	16,65	19,60
4 (EL)	21,01	23,19	19,58
5 (EL)	21,25	22,25	21,13
6 (EL)	21,01	20,36	21,33
7 (EL)	21,97	22,06	21,24
8 (EL)	24,05	24,03	23,90
9 (EL)	18,64	20,33	19,88
10 (EL)	26,42	25,57	23,43
11 (EL)	26,13	24,31	26,62
12 (EL)	23,95	22,02	21,02
13 (EL)	19,53	17,53	19,57
14 (EL)	22,24	24,41	23,94
15 (EL)	32,59	30,12	34,13
16 (EL)	22,82	23,04	21,73
17 (EL)	22,56	23,07	20,23
18 (EL)	26,54	26,61	28,68
19 (EL)	33,76	34,71	29,01
20 (EL)	36,11	37,03	29,47
21 (EL)	20,40	23,10	21,60
22 (EL)	35,30	39,54	31,99
23 (EL)	23,97	26,51	24,21
24 (EL)	36,72	34,97	35,15

Continuação da Tabela 20.

C. P.	Tenacidade I (Nm)	Tenacidade II (Nm)	Tenacidade III (Nm)
25 (EL)	29,23	30,03	34,65
26 (EL)	31,44	33,91	34,54
27 (EL)	18,50	17,91	19,08
28 (EL)	19,72	16,51	18,83
29 (EL)	22,36	17,79	21,26
30 (EL)	22,49	22,17	21,36
31 (EL)	22,03	20,90	19,12
32 (EL)	24,74	20,16	25,30
33 (EL)	19,75	18,56	20,30
34 (EL)	20,19	20,59	23,17
35 (EL)	21,25	20,74	21,05
Média	24,45	24,26	24,17
D.Padrão	5,22	5,92	5,00

5.2.3- Análise dos resultados

A análise dos resultados foi conduzida por espécie e abrange duas etapas. Na primeira, comparação de médias, estas foram analisadas para avaliar se as amostras podiam ser consideradas como retiradas do mesmo universo. As médias foram analisadas duas a duas, partindo-se dos três conjuntos de resultados referentes às tenacidades nas posições I, II e III. Na segunda, comparação de pares, partiu-se dos valores individuais das tenacidades nas posições I, II e III, analisando-se os conjuntos dois a dois.

5.2.3.1- Comparação de médias

♦ Posições de ensaio I e II

Nesta situação têm-se os resultados apresentados na Tabela (21).

Tabela 21- Comparação de médias (Posições I e II).

Espécie	$t_{x,y}$	t (95%)
Angelim Saia	1,255	2,064
Eucalipto Citriodora	0,756	2,025
Eucalipto Grandis	0,311	1,999
Pinus Elliottii	0,843	1,995

♦ **Posições de ensaio I e III**

Nesta situação têm-se os resultados apresentados na Tabela (22).

Tabela 22- Comparação de médias (Posições I e III).

Espécie	$t_{x,y}$	t (95%)
Angelim Saia	0,056	2,064
Eucalipto Citriodora	0,499	2,025
Eucalipto Grandis	1,465	1,999
Pinus Elliottii	1,356	1,995

♦ **Posições de ensaio II e III**

Nesta situação têm-se os resultados apresentados na Tabela (23).

Tabela 23- Comparação de médias (Posições II e III).

Espécie	$t_{x,y}$	t (95%)
Angelim Saia	1,146	2,064
Eucalipto Citriodora	0,289	2,025
Eucalipto Grandis	1,762	1,999
Pinus Elliottii	0,407	1,995

Para todos os casos analisados $t_{x,y} < t$ (95%). Desta forma, considera-se que os três conjuntos de resultados (tenacidades nas posições I, II e III) foram retirados do mesmo universo, para cada uma das espécies estudadas.

5.2.3.2- Comparação de pares

♦ Posições de ensaio I e II

Nesta situação têm-se os resultados apresentados na Tabela (24).

Tabela 24- Comparação de pares (Posições I e II).

Espécie	Intervalo de confiança
Angelim Saia	$-7,21 \leq \mu_d \leq 10,41$
Eucalipto Citriodora	$-18,63 \leq \mu_d \leq 23,35$
Eucalipto Grandis	$-2,69 \leq \mu_d \leq 2,89$
Pinus Elliottii	$-3,85 \leq \mu_d \leq 4,23$

♦ Posições de ensaio I e III

Nesta situação têm-se os resultados apresentados na Tabela (25).

Tabela 25- Comparação de pares (Posições I e III).

Espécie	Intervalo de confiança
Angelim Saia	$-8,86 \leq \mu_d \leq 9,02$
Eucalipto Citriodora	$-17,66 \leq \mu_d \leq 20,68$
Eucalipto Grandis	$-3,91 \leq \mu_d \leq 2,97$
Pinus Elliottii	$-4,41 \leq \mu_d \leq 4,97$

♦ Posições de ensaio II e III

Nesta situação têm-se os resultados apresentados na Tabela (26).

Tabela 26- Comparação de pares (Posições II e III).

Espécie	Intervalo de confiança
Angelim Saia	$-8,30 \leq \mu_d \leq 5,26$
Eucalipto Citriodora	$-24,33 \leq \mu_d \leq 22,65$
Eucalipto Grandis	$-3,83 \leq \mu_d \leq 2,69$
Pinus Elliottii	$-6,02 \leq \mu_d \leq 6,20$

Para todos os casos analisados, o intervalo de confiança da média das diferenças contém o zero. Assim sendo, para todas as espécies estudadas, é possível admitir a equivalência estatística para os valores de tenacidade obtidos nas três posições estudadas.

5.2.4- Outras considerações

Os resultados obtidos evidenciam a variação estatisticamente insignificante da tenacidade em relação aos anéis de crescimento da madeira. Esta conclusão é coerente com a obtida por Seeger (1937) apud Keith (1966), ou seja, a não variação da tenacidade entre corpos-de-prova solicitados na superfície radial comparados com os solicitados na superfície tangencial.

5.3- Avaliação da influência da umidade na tenacidade da madeira

5.3.1- Justificativa

A presente avaliação foi realizada à vista da necessidade de se conhecer, para diversas aplicações da madeira, a variação da tenacidade com a porcentagem de umidade. Diferentemente do que ocorre para diversas propriedades mecânicas da madeira, por exemplo: resistência e rigidez à compressão paralela às fibras, resistência ao cisalhamento, entre outras, para as quais é bem definida a influência da umidade, não há estudos referentes à referida quantificação para a tenacidade, em particular para espécies crescidas no Brasil.

5.3.2- Apresentação dos resultados

Nas Tabelas (27) a (46) estão apresentados, por espécie, os valores da tenacidade nos níveis de umidade mencionados.

Como nos casos anteriores, as sugestões de Drow et al. (1965) foram utilizadas para corrigir os valores da tenacidade em decorrência de pequenas variações das dimensões nominais da seção transversal das amostras ensaiadas.

Tabela 27- Espécie Angelim Saia- Tenacidade para umidade 0%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1A (AS)	33,18	0,07
2A (AS)	32,47	0,05
3A (AS)	32,08	0,07
4A (AS)	41,26	0,03
5A (AS)	37,34	0,04
6A (AS)	36,39	0,07
Média	35,45	0,06

Tabela 28- Espécie Angelim Saia- Tenacidade para umidade 6%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1B (AS)	31,18	5,97
2B (AS)	36,48	6,01
3B (AS)	28,58	6,00
4B (AS)	25,58	6,02
5B (AS)	29,84	6,02
6B (AS)	33,11	5,98
Média	30,80	6,00

Tabela 29- Espécie Angelim Saia- Tenacidade para umidade 12%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1C (AS)	28,90	12,00
2C (AS)	31,76	12,05
3C (AS)	28,98	12,03
4C (AS)	38,17	12,05
5C (AS)	25,69	12,07
6C (AS)	22,47	12,03
Média	29,33	12,04

Tabela 30- Espécie Angelim Saia- Tenacidade para umidade 20%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1D (AS)	35,27	19,98
2D (AS)	39,97	19,94
3D (AS)	33,65	20,07
4D (AS)	34,99	20,02
5D (AS)	36,43	20,05
6D (AS)	34,85	19,94
Média	35,86	20,00

Tabela 31- Espécie Angelim Saia- Tenacidade para umidade 30%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1E (AS)	37,81	30,02
2E (AS)	33,28	29,96
3E (AS)	37,79	29,94
4E (AS)	36,35	30,04
5E (AS)	40,34	30,04
6E (AS)	37,54	30,03
Média	37,19	30,01

Tabela 32- Espécie Eucalipto Citriodora- Tenacidade para umidade 0%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1A (EC)	38,38	0,01
2A (EC)	69,86	0,05
3A (EC)	68,64	0,03
4A (EC)	57,15	0,02
5A (EC)	63,82	0,05
6A (EC)	43,34	0,57
Média	56,87	0,12

Tabela 33- Espécie Eucalipto Citriodora- Tenacidade para umidade 6%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1B (EC)	60,85	5,97
2B (EC)	65,56	5,96
3B (EC)	62,56	5,97
4B (EC)	61,91	5,98
5B (EC)	58,39	6,02
6B (EC)	46,47	5,96
Média	59,29	5,98

Tabela 34- Espécie Eucalipto Citriodora- Tenacidade para umidade 12%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1C (EC)	68,78	11,96
2C (EC)	64,10	12,04
3C (EC)	69,98	12,03
4C (EC)	62,10	11,95
5C (EC)	58,73	12,03
6C (EC)	39,53	12,05
Média	60,54	12,01

Tabela 35- Espécie Eucalipto Citriodora- Tenacidade para umidade 20%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1D (EC)	65,96	20,02
2D (EC)	64,36	20,06
3D (EC)	60,50	20,03
4D (EC)	62,25	19,95
5D (EC)	70,18	20,03
6D (EC)	29,76	19,95
Média	58,84	20,01

Tabela 36- Espécie Eucalipto Citriodora- Tenacidade para umidade 30%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1E (EC)	56,66	30,04
2E (EC)	61,51	30,04
3E (EC)	55,78	29,96
4E (EC)	55,10	29,99
5E (EC)	58,34	29,97
6E (EC)	24,64	29,98
Média	52,01	30,00

Tabela 37- Espécie Eucalipto Grandis- Tenacidade para umidade 0%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1A (EG)	36,36	0,02
2A (EG)	39,89	0,05
3A (EG)	38,77	0,02
4A (EG)	47,32	0,02
5A (EG)	35,81	0,02
6A (EG)	20,93	0,02
Média	36,51	0,03

Tabela 38- Espécie Eucalipto Grandis- Tenacidade para umidade 6%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1B (EG)	44,11	6,00
2B (EG)	39,74	6,03
3B (EG)	40,20	5,98
4B (EG)	45,21	6,01
5B (EG)	35,61	6,05
6B (EG)	32,18	5,99
Média	39,51	6,01

Tabela 39- Espécie Eucalipto Grandis- Tenacidade para umidade 12%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1C (EG)	48,42	12,03
2C (EG)	40,41	11,99
3C (EG)	41,98	12,03
4C (EG)	44,47	12,02
5C (EG)	44,71	12,05
6C (EG)	38,05	12,03
Média	43,01	12,03

Tabela 40- Espécie Eucalipto Grandis- Tenacidade para umidade 20%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1D (EG)	49,33	19,97
2D (EG)	40,98	20,02
3D (EG)	48,02	19,94
4D (EG)	43,75	19,99
5D (EG)	51,43	20,03
6D (EG)	37,51	20,03
Média	45,17	20,00

Tabela 41- Espécie Eucalipto Grandis- Tenacidade para umidade 30%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1E (EG)	35,75	29,98
2E (EG)	39,26	30,05
3E (EG)	46,09	30,00
4E (EG)	44,58	30,03
5E (EG)	39,71	30,03
6E (EG)	27,81	29,95
Média	38,87	30,01

Tabela 42- Espécie Pinus Elliottii- Tenacidade para umidade 0%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1A (EL)	25,54	0,18
2A (EL)	24,02	0,12
3A (EL)	20,99	0,10
4A (EL)	30,70	0,10
5A (EL)	24,88	0,12
6A (EL)	22,02	0,03
Média	24,69	0,11

Tabela 43- Espécie Pinus Elliottii- Tenacidade para umidade 6%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1B (EL)	21,73	5,96
2B (EL)	21,14	6,03
3B (EL)	23,39	6,03
4B (EL)	23,33	5,96
5B (EL)	33,96	6,00
6B (EL)	21,60	5,98
Média	24,20	5,99

Tabela 44- Espécie Pinus Elliottii- Tenacidade para umidade 12%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1C (EL)	24,21	12,01
2C (EL)	23,45	12,05
3C (EL)	21,89	12,08
4C (EL)	22,25	12,06
5C (EL)	25,93	12,10
6C (EL)	24,78	12,02
Média	23,75	12,05

Tabela 45- Espécie Pinus Elliottii- Tenacidade para umidade 20%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1D (EL)	22,11	19,95
2D (EL)	22,02	20,05
3D (EL)	23,13	20,01
4D (EL)	24,05	20,07
5D (EL)	20,37	19,91
6D (EL)	25,26	19,95
Média	22,82	19,99

Tabela 46- Espécie Pinus Elliottii- Tenacidade para umidade 30%.

C. P.	Tenacidade (Nm)	Umidade (%)
1E (EL)	19,49	29,98
2E (EL)	23,38	30,06
3E (EL)	23,40	29,92
4E (EL)	25,87	30,07
5E (EL)	20,34	30,07
6E (EL)	19,77	29,98
Média	22,04	30,01

5.3.3- Análise dos resultados

Para melhor visualização dos resultados apresentados no item anterior, os mesmos foram sintetizados nos gráficos mostrados a seguir nas Figuras (27) a (30).

Figura 27- Tenacidade em função da umidade, para o Angelim Saia.

Figura 28- Tenacidade em função da umidade, para o Eucalipto Citriodora.

Figura 29- Tenacidade em função da umidade, para o Eucalipto Grandis.

Figura 30- Tenacidade em função da umidade, para o Pinus Elliottii.

Outra forma de representação é sugerida nas Figuras (31) a (34), nas quais, para cada espécie, os valores foram divididos pela tenacidade a 0% de umidade.

Figura 31- W_u/W_0 em função da umidade, para o Angelim Saia.

Figura 32- W_u/W_0 em função da umidade, para o Eucalipto Citriodora.

Figura 33- W_u/W_0 em função da umidade, para o Eucalipto Grandis.

Figura 34- W_u/W_0 em função da umidade, para o Pinus Elliottii.

Pode-se observar a impossibilidade de adotar um único padrão para representar a influência da umidade na tenacidade da madeira. As dicotiledôneas apresentaram variações de acréscimo e diminuição da tenacidade com o aumento da porcentagem de umidade. A conífera apresentou decréscimo, embora com proporções pouco acentuadas. Isto parece sugerir a influência da configuração anatômica dos espécimes, associada à variação de umidade.

Registra-se que foi feita opção por não considerar a hipótese de análise incluindo, para os cinco níveis de umidade, a média dos resultados das quatro espécies, o que levaria aos valores mostrados na Tabela (47).

Tabela 47- Valores médios de W_u/W_0 , cinco níveis de umidade.

Nível de umidade	W_u/W_0
0	1,00
6	0,99
12	1,01
20	1,05
30	0,98

Os valores constantes da Tabela (47) poderiam parecer evidenciar a variação insignificante da tenacidade com a umidade, no intervalo entre 0 e 20% de umidade, com decréscimo a partir daí. Entretanto, estariam sendo analisados os resultados de coníferas e dicotiledôneas, espécies nativas e de reflorestamento. Pareceu mais prudente não seguir esta alternativa de análise.

Tendências mais claras do padrão de variação da tenacidade com a umidade poderão, eventualmente, ser obtidas ensaiando-se um número mais amplo de espécies, as quais poderiam ser divididas em dicotiledôneas tropicais nativas, dicotiledôneas de reflorestamento e coníferas de reflorestamento.

5.3.4- Outras considerações

A não observação de um padrão único de variação da tenacidade com a umidade da madeira é coerente com as afirmações de Faherty; Williamson (1989).

Na hipótese de se ter admitida satisfatória a hipótese de variação insignificante da tenacidade com a umidade, no intervalo entre 0 e 20%, haveria concordância com as conclusões de Ghelmeziu (1937/38) apud Kollmann; Côté (1968), bem como de Ewing; Williams (1979).

5.4- Determinação da variabilidade dos valores da tenacidade da madeira

5.4.1- Justificativa

Esta avaliação foi conduzida visando a determinação do coeficiente de variação (relação entre o desvio padrão e a média) do conjunto de valores correspondentes à tenacidade, para cada espécie estudada. Valores do coeficiente de variação (*CV*) acima de 0,15 evidenciam satisfatória aleatoriedade das barras a partir das quais se procedeu a caracterização das espécies.

5.4.2- Apresentação dos resultados

Na Tabela (48), a seguir, estão apresentados os valores de *CV*, $u = 12\%$, para as trintas e seis espécies tropicais nativas consideradas.

Tabela 48- Coeficiente de variação- Espécies nativas.

Espécie	Coeficiente de Variação
Angelim Amargoso	0,39
Angelim Araroba	0,30
Angelim Ferro	0,40
Angelim Pedra	0,44
Angelim Pedra Verdadeiro	0,35
Angico Preto	0,58
Branquílio	0,32
Cafearana	0,39
Cambará Rosa	0,18
Casca Grossa	0,25
Castelo	0,24
Catanudo	0,24
Cedro Amargo	0,57
Cedro Doce	0,40

Continuação da Tabela 48.

Espécie	Coefficiente de Variação
Cedrorana	0,40
Copaíba	0,37
Cupiúba	0,46
Cutiúba	0,48
Garapa	0,53
Guaíçara	0,21
Guaruaia	0,40
Ipê	0,39
Itaúba	0,12
Jatobá	0,16
Louro Preto	0,40
Maçaranduba	0,23
Mandioqueira	0,20
Oitica Amarela	0,23
Oiuchu	0,31
Pau-óleo	0,34
Piolho	0,19
Quarubarana	0,37
Rabo de Arraia	0,35
Sucupira	0,24
Tatajuba	0,38
Umirana	0,37
Média	0,34

5.4.3- Análise dos resultados

A média dos coeficientes de variação considerados é 0,34. Nesta ordem de grandeza, é possível admitir a aleatoriedade das amostras, por espécie. Destaca-se que a NBR 7190/1997 admite, para as resistências a esforços normais $CV (médio) = 0,18$ e para as resistências a esforços tangenciais $CV (médio) = 0,28$ (item 6.3.3 do referido documento normativo).

Deve ser registrado que a variabilidade dos CV , cujos valores estão compreendidos entre o mínimo de 0,12 e o máximo de 0,58, pode ser atribuída às particularidades anatômicas das espécies consideradas.

5.4.4- Outras considerações

Não foi encontrada referência bibliográfica que permita comparação com os resultados aqui considerados.

5.5- Determinação da relação entre a densidade e a tenacidade da madeira

5.5.1- Justificativa

Esta avaliação foi realizada em razão de a densidade ser largamente utilizada para estimar outras propriedades de resistência e de rigidez da madeira, sendo tais estimativas muito satisfatórias, conforme os registros constantes no Capítulo 3 deste trabalho.

Foi escolhido o parâmetro densidade aparente da madeira para quantificar esta influência na tenacidade da madeira. Em virtude de a NBR 7190/1997 indicar 12% como umidade de referência para as propriedades da madeira, este teor foi adotado no presente estudo.

Considerando-se a inexistência da avaliação em questão para as espécies tropicais crescidas no Brasil, foram aqui considerados os resultados da densidade aparente ρ_{12} ou simplesmente densidade, como será mencionado daqui em diante, e de tenacidade W_{12} , ambas referidas à umidade de 12%, para trinta e seis espécies crescidas na Floresta Amazônica.

5.5.2- Apresentação dos resultados

Na Tabela (49), a seguir, estão apresentados os resultados da densidade e da tenacidade a 12%, para trinta e seis espécies tropicais nativas consideradas. Os

valores se constituem na média de, no mínimo, doze corpos-de-prova por espécie. Os valores individuais não são mostrados, por razões de espaço no texto, mas poderão ser consultados na Base de Dados do SET/LaMEM.

Tabela 49- Valores da tenacidade e da densidade ($u = 12\%$).

Espécie	Tenacidade (Nm)	Densidade aparente (g/cm³)
Angelim Amargoso	96	0,77
Angelim Araroba	69	0,67
Angelim Ferro	174	1,17
Angelim Pedra	88	0,69
Angelim Pedra Verdadeiro	198	1,13
Angico Preto	146	0,89
Branquilha	92	0,81
Cafearana	74	0,68
Cambará Rosa	33	0,67
Casca Grossa	122	0,79
Castelo	140	0,76
Catanudo	131	0,80
Cedro Amargo	46	0,51
Cedro Doce	53	0,50
Cedrorana	45	0,57
Copaíba	59	0,70
Cupiúba	67	0,85
Cutiúba	162	1,15
Garapa	144	0,92
Guaíçara	228	1,09
Guaruaia	127	0,92
Ipê	150	1,06
Itaúba	145	0,91
Jatobá	202	1,08
Louro Preto	67	0,68
Maçaranduba	197	1,14
Mandioqueira	119	0,85
Oitica Amarela	134	0,76
Oiuchu	174	0,93
Pau-óleo	61	0,70
Piolho	145	0,83
Quarubarana	49	0,54
Rabo de Arraia	74	0,72
Sucupira	172	1,10
Tatajuba	97	0,94
Umirana	52	0,71

5.5.3- Análise dos resultados

Os resultados foram objeto de avaliação utilizando-se os procedimentos usuais de análise de regressão. Diferentes modelos foram testados, sendo que o mais conveniente se mostrou aquele que relacionou o logaritmo neperiano das variáveis, conforme apresentado na Figura (35).

Figura 35- Gráfico do logaritmo da tenacidade contra o logaritmo da densidade.

A expressão relacionando as variáveis é:

$$\ln W_{12} = 5,025 + 1,925 \ln \rho_{12}, \quad (30)$$

neste caso, o valor do coeficiente de correlação (R^2) é 0,87.

Outra maneira de representar os dados consta na Figura (36).

Figura 36- Efeito da densidade na tenacidade de espécies tropicais.

Nestas condições, tem-se a expressão:

$$W_{12} = 152,17 \rho_{12}^{1,93} \quad (31)$$

É possível admitir que a expressão exponencial é bastante satisfatória para quantificar a relação entre a densidade e a tenacidade da madeira, a 12% de umidade, para espécies tropicais crescidas no Brasil.

5.5.4- Outras considerações

Os resultados obtidos estão de acordo com a proposição de autores como Koehler (1933), Ghelmeziu (1937/38) apud Kollmann; Côté (1968), Cockrell; Knudson (1973) e Panshin; Zeeuw (1980), que trabalharam com espécies de madeiras crescidas em clima predominantemente temperado.

Embora alguns autores, como Kollmann; Côté (1968), tenham admitido correlação dada por polinômio do primeiro grau, valores mais consistentes do coeficiente de correlação e da distribuição de resíduos indicam, para as espécies tropicais crescidas no Brasil, que o modelo exponencial é o mais indicado.

5.6- Determinação da relação entre a tenacidade e a resistência da madeira à compressão paralela às fibras

5.6.1- Justificativa

Esta avaliação foi realizada em razão de a NBR 7190/1997 assumir a resistência à compressão paralela às fibras como a propriedade mecânica fundamental, inclusive servindo como estimador para outros parâmetros necessários ao cálculo de peças de madeira a serem empregadas em aplicações estruturais de várias naturezas.

O teor de umidade de 12% foi escolhido por tratar-se do valor de referência adotado pela NBR 7190/1997.

Considerando a inexistência da avaliação em questão para as espécies tropicais crescidas no Brasil, foram aqui considerados os resultados da resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,12}$) e da tenacidade (W_{12}), ambas referidas à umidade de 12%, para trinta e quatro espécies da Floresta Amazônica.

5.6.2- Apresentação dos resultados

Na Tabela (50), a seguir, estão apresentados os valores da tenacidade e da resistência à compressão paralela às fibras a 12%, para as trinta e quatro espécies tropicais consideradas. Os resultados são a média de, no mínimo, doze corpos-de-prova por espécie.

Tabela 50- Valores da tenacidade e da resistência à compressão paralela às fibras ($u = 12\%$).

Espécie	Tenacidade (Nm)	Resistência à compressão paralela às fibras ($10^5 N/m^2$)
Angelim Amargoso	96	599
Angelim Araroba	69	508
Angelim Ferro	174	795
Angelim Pedra	88	592
Angelim Pedra Verdadeiro	198	775
Angico Preto	146	725
Branquilha	92	485
Cafearana	74	575
Cambará Rosa	33	345
Casca Grossa	122	585
Castelo	140	548
Catanudo	131	506
Cedro Amargo	46	391
Cedro Doce	53	315
Cedrorana	45	413
Copaíba	59	502
Cupiúba	67	537
Cutiúba	162	790
Garapa	144	734
Guaruaia	127	624
Ipê	150	762
Itaúba	145	690
Jatobá	202	935
Louro Preto	67	569
Maçaranduba	197	829
Mandioqueira	119	708
Oitica Amarela	134	699
Oiuchu	174	774
Pau-óleo	61	524
Piolho	145	619
Quarubarana	49	378
Rabo de Arraia	74	575
Sucupira	172	937
Umirana	52	533

5.6.3- Análise dos resultados

Os resultados foram objeto de avaliação utilizando-se os procedimentos usuais de análise de regressão. Diferentes modelos foram testados, sendo que a função linear se mostrou como a mais conveniente. A Figura (37) resume os resultados obtidos.

Figura 37- Gráfico da tenacidade contra a resistência à compressão paralela às fibras.

A expressão relacionando as variáveis é:

$$W_{12} = -64,261 + 0,287 f_{c_0,12}, \quad (32)$$

neste caso o valor de R^2 é 0,89.

Deve ser destacado que a Eq.(32) pode ser considerada válida no intervalo compreendido entre os valores mínimo e máximo da resistência à compressão paralela às fibras das espécies consideradas.

Desta forma pode-se admitir que a Eq.(32) é satisfatória para quantificar a relação entre W_{12} e $f_{c_0,12}$, para espécies tropicais crescidas no Brasil.

5.6.4- Outras considerações

À vista da ausência de informações bibliográficas no tópico aqui estudado, não se consegue comparar os resultados obtidos neste trabalho.

5.7- Determinação da relação entre a tenacidade e a resistência convencional da madeira no ensaio de flexão estática

5.7.1- Justificativa

Esta avaliação foi realizada para viabilizar eventuais estimativas da tenacidade a partir da resistência convencional da madeira no ensaio de flexão estática, cujos valores são disponíveis para numerosas espécies de coníferas e dicotiledôneas, nativas ou de reflorestamento.

O teor de umidade de 12% foi escolhido por tratar-se do valor de referência adotado pela NBR 7190/1997.

Como não existe avaliação anterior do tópico estudado para espécies crescidas no Brasil, foram aqui considerados os resultados da resistência convencional da madeira no ensaio de flexão estática ($f_{m,12}$) e da tenacidade (W_{12}), ambas referidas à umidade de 12%, para trinta e três espécies da Floresta Amazônica.

5.7.2- Apresentação dos resultados

Na Tabela (51), a seguir, estão apresentados os valores da tenacidade e da resistência convencional da madeira no ensaio de flexão estática a 12%, para as trinta e três espécies tropicais consideradas. Os resultados são a média de, no mínimo, doze corpos-de-prova por espécie.

Tabela 51- Valores da tenacidade e da resistência convencional da madeira obtida no ensaio de flexão estática ($u = 12\%$).

Espécie	Tenacidade (Nm)	Resistência convencional no ensaio de flexão estática ($10^5 N/m^2$)
Angelim Amargoso	96	892
Angelim Araroba	69	754
Angelim Ferro	174	1320
Angelim Pedra	88	922
Angico Preto	146	1203
Branquilha	92	829
Cafearana	74	937
Cambará Rosa	33	632
Casca Grossa	122	1067
Castelo	140	1030
Catanudo	131	831
Cedro Amargo	46	669
Cedro Doce	53	566
Cedrorana	45	605
Copaíba	59	799
Cupiúba	67	786
Cutiúba	162	1269
Garapa	144	1189
Guarucaia	127	956
Ipê	150	1226
Itaúba	145	1166
Jatobá	202	1613
Louro Preto	67	927
Maçaranduba	197	1363
Mandioqueira	119	1131
Oitica Amarela	134	1075
Oiuchu	174	1225
Pau-óleo	61	800
Quarubarana	49	674
Rabo de Arraia	74	793
Sucupira	172	1465
Tatajuba	97	1106
Umirana	52	656

5.7.3- Análise dos resultados

Os resultados foram objeto de avaliação utilizando-se os procedimentos usuais de análise de regressão. Diferentes modelos foram testados, sendo que a função linear se mostrou como a mais conveniente. A Figura (38) resume os resultados obtidos.

Figura 38- Gráfico da tenacidade contra a resistência convencional no ensaio de flexão estática.

A expressão relacionando as variáveis é:

$$W_{12} = -61,652 + 0,172 f_{m,12}, \quad (33)$$

neste caso o valor de R^2 é 0,93.

A Eq.(33) pode ser considerada válida no intervalo compreendido entre os valores mínimo e máximo da resistência convencional obtida no ensaio de flexão estática das espécies consideradas.

Assim sendo, é possível admitir que a Eq.(33) é satisfatória para quantificar a relação entre W_{12} e $f_{m,12}$, para espécies tropicais crescidas no Brasil.

5.7.4- Outras considerações

À vista da ausência de informações bibliográficas no tópico aqui estudado, não se consegue comparar os resultados obtidos neste trabalho.

6- CONCLUSÕES

A partir dos resultados da experimentação realizada, bem como das correspondentes discussões, conforme apresentado no Capítulo 5, podem ser registradas as seguintes conclusões:

6.1- Não foi detectada variação estatisticamente significativa da tenacidade da madeira ao longo do comprimento de barras isentas de defeito, para um mesmo nível de umidade.

6.2- Não foi detectada variação estatisticamente significativa da tenacidade da madeira variando-se as posições consideradas nos ensaios realizados (Posições I, II e III, item 5.5.5).

6.3- Não foi detectado um padrão único para representar a influência da umidade (no intervalo compreendido entre 0 e 30%) na tenacidade da madeira.

6.4- O valor médio do coeficiente de variação da tenacidade para trinta e seis espécies tropicais nativas é 0,34. A variabilidade dos *CV* pode ser atribuída a particularidades anatômicas das espécies consideradas.

6.5- O modelo exponencial é satisfatório para representar a influência da densidade na tenacidade da madeira, para $u = 12\%$. A expressão:

$$W_{12} = 152,17 \rho_{12}^{1,93},$$

pode ser empregada no caso de espécies tropicais brasileiras.

6.6- A função linear é modelo satisfatório para representar a relação entre a tenacidade e a resistência da madeira à compressão paralela às fibras. A expressão:

$$W_{12} = -64,261 + 0,287 f_{c_0,12},$$

pode ser empregada no caso de espécies tropicais brasileiras.

6.7- A função linear é modelo satisfatório para representar a relação entre a tenacidade e a resistência convencional da madeira no ensaio de flexão estática. A expressão:

$$W_{12} = -61,652 + 0,172 f_{m,12},$$

pode ser empregada no caso de espécies tropicais brasileiras.

Algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuro são destacadas:

- ◆ Definição do padrão (ou padrões) para representar a influência da umidade na tenacidade da madeira. Isto poderá ser alcançado ampliando-se o número de espécies ensaiadas para as coníferas e para as dicotiledôneas nativas e de reflorestamento.

- ◆ Quantificação de eventual variação da tenacidade com as dimensões dos corpos-de-prova ensaiados. Isto poderá ser alcançado tomando-se seções transversais nominais, por exemplo, de $1\text{cm} \times 1\text{cm}$; $3\text{cm} \times 3\text{cm}$ e até superiores.
- ◆ Quantificação da influência da temperatura na tenacidade da madeira.
- ◆ Quantificação da influência da impregnação contra a demanda biológica na tenacidade da madeira.

7- ANEXO

Ajustes prévios na Máquina para Determinação da Tenacidade da Madeira.

O ângulo inicial θ_i , mostrado na Figura (39), pode ser 30, 45 ou 60°. Após o rompimento da amostra, o pêndulo atinge o ângulo θ_a . Autores como Wangaard (1950) recomendam que a diferença entre θ_i e θ_a não deve superar 10°, de modo a manter-se a confiabilidade dos resultados.

Figura 39- Esquema da máquina desenvolvida por Siqueira.
Fonte- Adaptada de Siqueira (1986).

O centro de gravidade CG apresentado na Figura (39), está a uma distância l do eixo de rotação O . No início do movimento, o centro de massa é posicionado a uma altura h_i em relação ao seu ponto mais baixo, o pêndulo é solto livremente, e a carga é aplicada na amostra através de uma corrente flexível, fixada ao redor de um tambor, o qual está posicionado na cabeça do pêndulo. Devido à absorção de parte da energia contida no pêndulo pela amostra ao romper-se, esse atinge uma altura h_a ao final do movimento.

A diferença entre a energia contida no pêndulo antes e depois do contato com a amostra resulta na energia necessária para produzir a falha nesse corpo-de-prova.

Sabe-se que a configuração do sistema, no caso o pêndulo, varia com o passar do tempo. A energia cinética U_K do sistema aumenta quando o pêndulo é solto da altura inicial h_i até atingir o seu ponto mais baixo, onde agora possui energia cinética máxima. Depois, começa a diminuir e retorna ao seu mínimo novamente quando o pêndulo atinge a altura final h_a .

Pode-se dizer que, quando a energia cinética U_k varia de ΔU , enquanto muda a sua configuração, sua energia potencial U_p varia de um valor de mesmo módulo e sinal contrário, de forma que a soma das duas variáveis é nula:

$$\Delta U_K + \Delta U_P = 0 \quad (34)$$

Tem-se que $W = \Delta U$, onde W é o trabalho recebido pela madeira para romper. Combinando-se o teorema trabalho-energia, com a Eq.(34):

$$W = \Delta U_K = -\Delta U_P \quad \text{ou} \quad W = -\Delta U_K = \Delta U_P \quad (35)$$

É possível agora calcular a tenacidade W ou a energia absorvida pela amostra, usando a diferença de energia cinética U_K ou de energia potencial U_P . No caso em estudo, é usada a segunda opção:

$$W = \Delta U_P = U_{P_a} - U_{P_i} \quad (36)$$

$$W = Bh_a - Bh_i = B(h_a - h_i) \quad (37)$$

Pode-se expressar as alturas h_a e h_i em termos dos ângulos θ_a e θ_i :

$$h_a = l - l \cos \theta_a = l(1 - \cos \theta_a) \quad (38)$$

$$h_i = l - l \cos \theta_i = l(1 - \cos \theta_i) \quad (39)$$

Finalmente, obtém-se a expressão para a tenacidade W :

$$W = B l (\cos \theta_a - \cos \theta_i) \quad (40)$$

onde:

W - tenacidade (Ncm) ou (Nm).

B - peso do pêndulo (N).

l - distância do centro de rotação do braço ao centro de gravidade do pêndulo (cm) ou (m).

θ_i - ângulo inicial ($^\circ$).

θ_a - ângulo final do pêndulo em relação à vertical (AO) depois da ruptura da amostra em teste ($^\circ$).

Para obter-se a tenacidade W são necessários: o peso B do pêndulo, a distância l do eixo de rotação ao centro de gravidade CG e os ângulos θ_a e θ_i .

A distância l é conhecida, o ângulo θ_i é fixado e o ângulo θ_a é lido após ocorrer a ruptura da amostra ensaiada. Resta, então, determinar o peso da cabeça do pêndulo.

Admitindo-se que o corpo-de-prova consuma toda a energia na ruptura, pode-se assumir $\theta_a = 0$. Sendo $l = 63cm$ a maior distância ao eixo de rotação, posição 1 mostrada na Figura (10), $\theta_i = 60^\circ$ (maior ângulo disponível para ajuste) e supondo, por exemplo, um valor de $W = 75Nm$, tem-se:

$$W = B l (\cos\theta_a - \cos\theta_i)$$

$$75 = B \times 0,63 (\cos\theta_a - \cos\theta_i)$$

$$B \cong 240N$$

Portanto, a cabeça do pêndulo não deve pesar menos do que $240N$ para fornecer energia equivalente a $75Nm$.

8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKANDE, J.A. Failure in wood related to decay weight losses. *Forest Products Journal*, v.40, p.47-53, 1990.
- ASKELAND, D.R. *The science and engineering of materials*. 3ed. Boston, PWS Publishing Company, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro, 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D143-52* - Standard methods of testing small clear specimens of timber, Part 22. In: *Annual book of ASTM standards*. Philadelphia, PA, 1981.
- BAKER, G. Some factors affecting the toughness of White Ash. *Forest Products Journal*, v.20, n.8, p.51-52, 1970.
- BAREFOOT JR, A.C. Select wood characteristics of young Yellow-Poplar, Part I - Specific gravity and toughness. *Forest Products Journal*, v.3, n.6, p.233-239, 1963.
- BAREFOOT JR, A.C. Influence of cellulose, lignin and density on toughness of Yellow-Poplar. *Forest Products Journal*, v.15, n.1, p.46-49, 1965.
- BODIG, J.; JAYNE, B.A. *Mechanical of wood and wood composites*. New York, Van Nostrand Reinhold, 1992.
- CHAPMAN, A.D.; SCHEFFER, T.C. Effect of blue stain on specific gravity and strength of Southern Pine. *Journal of Agricultural Research*, v.61, n.2, p.125-133, July, 1940.
- CLARKE, S.H. Report of the Forest Products Research Board for the year 1935. *Forestry*, v.9, n.132, p.7, 1935.
- COCKRELL, R.A.; KNUDSON, R.M. A comparison of static bending, compression and tension parallel to grain and toughness properties of compression wood and normal wood of Giant Sequoia. *Wood Science and Technology*, v.7, p.241-250, 1973.

- COUTTS, R.S.P.; WARD, J.V. Microstructure of wood-fiber-plaster composites. *Journal of Materials Science Letters*, v.6, p.562-564, 1987.
- DROW, J.T.; MARKWARDT, L.J.; YOUNGQUIST, W.G. Results of impact tests to compare the pendulum impact and toughness test methods. *U. S. For. Prod. Lab. Rep.*, n.2109, 1965.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *DIN 52 189 - Schlagbiegeversuch Bestimmung der Bruchschlagarbeit*. Berlin, 1981.
- EWING, P.D.; WILLIAMS, J.G. Thickness and moisture effect in the fracture toughness of Scots Pine. *J. Mater. Sci.*, v.14, n.12, p.2959-2966, 1979.
- FAGAN, G.B.; McLAIN, T.E. The influence of small grain angle variation on toughness. *Wood and Fiber Science*, v.15, n.2, p.94-101, 1983.
- FAHERTY, K.F.; WILLIAMSON, T.G. *Wood engineering and construction handbook*. McGraw-Hill Publishing Company, 1989.
- FORSAITH, C.C. The morphology of wood in relation to brashness. *Journal of Forestry*, v.19, p.237-249, 1921.
- GERHARDS, C.C. Effects of type of testing equipment and specimen size on toughness of wood. *U. S. D. A. Forest Serv. Res. Forest Products Laboratory*, R.P.97, p.1-12, 1968.
- GERRY, E. Science. *U.S.*, v.41, p.179, 1915.
- GUY, A.G. *Ciência dos materiais*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1980.
- HAYDEN, H.W.; MOFFATT, W.G.; WULFF, J. *The structure and properties of Material: Mechanical Behavior*. v.3. New York, John Wiley & Sons, 1965.
- HARDIE, K. A review of strength testing as a measure of biodeterioration of wood and wood based materials. *International Biodeteriotion Bulletin ISSN*, v.16, n.1, p.1-8, 1980.
- HORATH, L. *Fundamentals of materials science for technologists - properties, testing and laboratory exercises*. Prentice-Hall, Inc., 1995.
- INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. *ISO 3348(E) - Wood: determination of impact bending strength*, 1975.
- JOHN, V. *Introduction to engineering materials*. 3.ed. The Macmillan Press LTD, 1992.
- KEITH,C.T. Annual layers affect resistance of wood to impact. *Forest Products Journal*, v.14, n.7, p.285-289, July. 1964.

- KEITH, C.T. Effect of orientation of annual layers on the resistance of wood to impact loading. *Journal of Materials*, v.1, n.3, p.759-769, 1966.
- KOCH, G.; SCHWAB, E.; KRUSE, K.; BAUCH, J. Untersuchung der dynamischen Belastbarkeit des Holzes sekundär geschädigter Fichten (*Picea abies* [L.] Karst.) aus extrem windexponierten Hochlagen des Osterzgebirges. *Holz als Roh- und Werkstoff*, v.54, n.5, p.313-319, 1996.
- KOEHLER, A. Causes of brashness in wood. *U. S. Dep. Agr. Tech. Bull.*, n.342, Washington, D.C., 1933.
- KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ, W.A. *Principles of wood science and technology: Solid wood*. Springer Verlag, 1968.
- KOLLMANN, F.F.P.; KUENZI, E.W.; STAMM, A.J. *Principles of wood science and technology: Wood based materials*. Springer Verlag, 1975.
- KRETSCHMANN, D.E.; GREEN, D.W. Modeling moisture content - mechanical property relationships for clear Southern Pine. *Wood and Fiber Science*, v.28, n.3, p.320-337, 1996.
- LANGWIG, J.E.; MEYER, J.A.; DAVIDSON, R.W. Influence of polymer impregnation on mechanical properties of basswood. *Forest Products Journal*, v.18, n.7, p.33-36, July, 1968.
- MARKWARDT, L.J.; WILSON, T.R.C. Strength and related properties of woods grown in the United States. *U. S. Dep. Agr. Tech. Bull.*, Washington, D.C., n.479, p.67, 1935.
- MARKWARDT, L.J.; HECK, G.E. Standard terms for describing wood. *U.S.D.A. Forest Service F.P.L.*, Madison, Wisconsin, n. R1169, Jan. 1938.
- MARKWARDT, L.J. Aircraft woods: their properties, selection, and characteristics. *Nat. Advisory Comm. Aeron.*, Rep. n.354, 1941.
- OSVALDO, E.; HENNINGSSON, B.; DANIEL, G. Changes in toughness and fracture characteristics of wood attacked by the blue stain fungus *Lasiodiplodia theobromae*. *Holzforschung*, v.52, n.1, p.82-88, 1998.
- PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C. *Textbook of wood technology*. McGraw Hill, New York, 1980.
- RESNICK, R.; HALLIDAY, D. *Física I*. 4.ed., Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 1985.
- ROWELL, R.M.; BANKS, W.B. Tensile strength and toughness of acetylated Pine and Lime flakes. *British Polymer Journal*, v.19, p.479-482, 1987.

- SCHNEIDER, M.H.; PHILLIPS, J.G.; BREBNER, K.I.; TINGLEY, D.A. Toughness of polymer impregnated Sugar Maple at two moisture contents. *Forest Products Journal*, v.39, n.6, p.11-14, 1989.
- SCHNIEWIND, A.P.; POZNIAK, R.A. On the fracture toughness of Douglas Fir wood. *Engineering Fracture Mechanics*, v.2, p.223-233, 1971.
- SEARS, F.; ZEMANSKY, M.W.; YOUNG, H.D. *Mecânica da partícula e dos corpos*. 2.ed. Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 1985.
- SIQUEIRA, M.L. *Projeto e construção de máquina para determinação da tenacidade de madeira*. São Carlos, 1986. 103p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SIQUEIRA, M.L. *Contribuição para a instrumentação da máquina de medir a tenacidade/impacto da madeira*. São Carlos, 1990. 167p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SMITH, W.F. *Princípios de ciência e engenharia de materiais*. 3.ed., Portugal, McGRAW-HILL de Portugal- Ltda, 1998.
- SULZBERGER, P.H. The effect of temperature on the strength properties of wood, plywood and glued joints at various moisture contents CSIRO *Div. For. Prod.*, Australia, South Melbourne, 1948.
- TIEMANN, H.D. *Wood Technology*. 3^a ed., Pitman Publ. Corp., New York, Toronto, London, 1951.
- VAN VLACK, L.H. *Princípios de ciências e tecnologia dos materiais*. 4.ed., Boston, PWS Publishing Company, 1984.
- VAN VLACK, L.H. *Elements of materials science and engineering*. 6.ed., Addison, Wesley Publishing Company, 1989.
- WANGAARD, F.F. *The mechanical properties of wood*. John Wiley & Sons, Inc., 1950.
- WENGERT, E.M. Relationship between toughness of hardwoods and specific gravity. *Wood Science*, v.11, n.4, p.233, 1979.

9- BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

FUSCO, P.B. *Estruturas de concreto: fundamentos estatísticos da segurança das estruturas*. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo, 1977.

GEMMEL, A.R. *Anatomia do vegetal em desenvolvimento*. São Paulo, Coleção Temas de Biologia, v.19, 1980.

HARLOW, W.M.; HARRAR, E.S. *Textbook of dendrology*. New York, Mc Graw Hill Book Company, 4. Ed, 1958.

HELLMEISTER, J.C. Madeiras e suas características. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 1., São Carlos, 1983. *Anais*. São Paulo, USP-EESC. v.1, p.1-32, 1983.

INFORMATIVO QUADRIMESTRAL SOBRE O SETOR FLORESTAL PAULISTA. Florestar Estatístico. São Paulo, v.2, nov. 1994 / fev. 1995.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. INPE Notícias. São José dos Campos, SP, Brasil, v.4, n.13. jan./fev. 1998.

LOGSDON, N.B. *Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira*. São Carlos, 1998. 174p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MAINIERI, C. *Identificação das principais madeiras de comércio no Brasil*. São Paulo, IPT, Boletim 31, 1956, 62p, 1956.

MEYER, L.P. Probabilidade: aplicações à estatística. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico S.A., 1972.

PINHEIRO, R.V.; ROCCO LAHR, F.A. Influência da preservação contra a demanda biológica em propriedades de resistência e de elasticidade da madeira. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 7., São Carlos, 2000. *Anais*. São Paulo, USP-EESC., CD-ROM, 2000.

RAWITSCHER, F.K. *Elementos básicos de botânica*. São Paulo, Brasil, Editora Centro Universitário, 1964.

ROCCO LAHR, F.A. *Considerações a respeito da variabilidade de propriedades de resistência e elasticidade da madeira*. São Carlos, 1990. 161p. Tese (Livre Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.